

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
іменіГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний

(повна назва інституту/факультету)

Оптичних та оптико-електронних приладів

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 681.78

«До захисту допущено»

Завідувачка кафедри

_____ В. Г. Колобродов
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 2019р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації): 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і назва спеціальності)

на тему: Лінзова зум-афокальна система

Виконала: студент 6 курсу, групи ПО-81мп
(шифр групи)

Лісняк Карина Сергіївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник д.т.н., професор Чиж Ігор Генріхович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант стартап-проект д.е.н., доцент Бояринова К.С.

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент. Начальник сектору КПСПБ «Арсенал» Фесенко В.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у
цій магістерській дисертації немає записок з
праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

Реферат

Магістерська дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загального висновку, списку літератури і додатків. Дисертація містить 107 сторінок, 56 ілюстрацій, 29 таблиць та 21 джерел за переліком посилань. Загальний обсяг роботи – 119 сторінок.

Актуальність теми. Переважна кількість існуючих на ринку тепловізорів мають сталі значення кутового поля зору. Використання тепловізорів на практиці часто потребує зміни масштабу зображення на моніторі. Таку зміну забезпечують або оптичним методом, або використанням відповідних програм масштабування зображень на екрані монітору. Проте оптичний метод дозволяє забезпечувати потрібну роздільну здатність тепловізора при різних кутах його поля зору, без втрати чи зменшенні роздільної здатності.

Тепловізори оснащені зум-об'єктивом мають порівняно високу собівартість і ціну. Через це виникає потреба додання до менш коштовних тепловізорів із сталим полем зору оптичної насадки, яка б забезпечувала їм функцію зум-об'єктиву. Такою насадкою може бути пристрій з зум-афокальною оптичною системою. Плавна чи дискретна зміна кутового збільшення телескопічної системи зум-афокальної насадки здатна забезпечити оптиці тепловізора властивості зум-трансфокатора із відповідною зміною кута поля зору і з оптичним масштабуванням зображення на моніторі.

Мета: створення оптичної системи насадки до тепловізорів, що забезпечують їм додаткову оптичну зум-функцію.

Задачі:

1. Огляд існуючих афокальних оптичних систем трансфокаторів з аналізом їх переваг та недоліків.
2. Обґрунтування вибору структури лінзової зум-афокальної оптичної системи, яка б забезпечувала тепловізору зміну поля зору у заданому діапазоні і мала мінімально простий механізм переміщення оптичних компонентів.

3. Параметричний синтез зум-афокальної оптичної системи з оптимізацією конструктивних параметрів і розробкою механізму переміщень оптичних компонентів.

Об'єкт дослідження: Забезпечення зміни кутового поля зору оптичної системи тепловізора із стаціонарним штатним об'єктивом і сталим полем зору.

Предмет дослідження: Оптична система лінзової зум-афокальної насадки для зміни кута поля зору штатного об'єктиву тепловізора.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач в роботі використовувалася: теорія Гаусової оптики, теорія оптичних телескопічних систем, теорія аберацій третього степеневого порядку, комп'ютерне моделювання функцій зум-афокальної телескопічної системи, методи параметричного синтезу лінзових компонентів системи, сучасні методи оптимізації конструктивних параметрів оптичних систем, використання комп'ютерної програми аналізу оптичних систем ZEMAX.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Розроблено метод параметричного синтезу трикомпонентних та чотирьох компонентних зум-афокальних оптичних систем з винесеною за їх межі вихідною зіницею (апертурною діафрагмою). Показано функціональні можливості таких систем. Знайдені закони пересувань оптичних компонентів вказаних систем.

2. **Практичне значення одержаних результатів:** отримано формули та графіки, що дозволяють виконувати габаритні розрахунки оптичних системи трикомпонентних та чотирьох компонентних зум-афокальних систем при заданому діапазоні кутового збільшення, заданому розташуванні та діаметрі вхідної зіниці штатного об'єктиву тепловізора, можливість отримувати різне значення кутового збільшення тепловізора із збереженням якості зображення об'єкту, що спостерігається.

Апробація результатів дисертації:

Основні результати дисертації представлені в доповідях на двох науково-технічних конференціях та публікаціями в журналі :

1. Третя Українська науково-технічна конференція «Спеціальне приладобудування: стан та перспективи» 4-5 грудня 2018 р.м. Київ.
2. XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» 15-16 травня 2019 м. Київ.
3. Міжнародний науково-технічний журнал "Наукові вісті КПП" , випуск №3 2019 р.
4. Міжнародний науково-технічний журнал "Наукові вісті КПП" , випуск №5-6 2019 р.

Ключові слова: трикомпонентна та чотирьох компонентна зум-афокальна система, синтез зум-афокальних лінзових систем.

Abstract

The master's thesis consists of an introduction, four sections, a general conclusion, a list of literature and applications. The dissertation contains 107 pages, 56 illustrations, 29 table and 21 references. The total volume of work is 119 pages.

The actuality of the topic. The overwhelming number of existing thermal imagers on the market have a constant value of the angular field of view. In practice, the use of thermal imagers often requires resizing the monitor. Such a change is provided either by the optical method or by the use of appropriate image scaling programs on the monitor screen. However, the optical method allows you to provide the desired resolution of the thermal imager at different angles of its field of view, without losing or reducing the resolution.

Zoom lenses have relatively high cost and cost. Because of this, there is a need to add to the less expensive thermal imagers with a permanent field of view of the optical nozzle, which would provide them with the function of a zoom lens. Such a nozzle may be a device with a zoom-afocal optical system. A smooth or discrete change in the angular magnification of the telescopic zoom-afocal nozzle system is capable of providing the imager optics with zoom-zoom properties with a corresponding field of view angle change and an optical image zoom on the monitor.

Purpose: To create an optical attachment system for thermal imagers that provide them with additional optical zoom function.

Objectives:

1. An overview of existing afocal optical zoom systems with an analysis of their advantages and disadvantages.
2. Substantiation of the choice of the structure of the lens zoom-afocal optical system, which would provide the imager with a change of field of view in a given range and minimally simple mechanism of movement of optical components.

3. Parametric synthesis of the zoom-afocal optical system with optimization of design parameters and development of the mechanism of movement of optical components.

Object of Study: To provide a change in the angular field of view of an optical thermal imaging system with a stationary standard lens and a constant field of view.

Subject of research: Optical zoom-afocal lens system for changing the angle of view of a standard lens of an imager.

Research methods. The following tasks were used in the work: Gaussian optics theory, theory of optical telescopic systems, theory of third-order aberrations, computer modeling of functions of zoom-afocal telescopic system, methods of parametric synthesis of lens components of the system, modern methods of optimization of structural parameters, computer program for the analysis of optical systems ZEMAX.

Scientific novelty of the obtained results:

1. The method of parametric synthesis of three-component and four-component zoom-afocal optical systems with the outlet pupil (aperture diaphragm) taken out of them is developed. Functional capabilities of such systems are shown. The laws of motion of the optical components of these systems are found.

2. Practical value of the obtained results: formulas and graphs are obtained, which allow to perform dimensional calculations of optical systems of three-component and four-component zoom-afocal systems at a given range of angular magnification, a given location and diameter of the inlet pupil of the standard lens of the imager, and the possibility to obtain increase the thermal imager while maintaining the quality of the observed object image.

Testing of dissertation results:

The main results of the dissertation are presented in reports at two scientific-technical conferences and journal publications:

1. Third Ukrainian Scientific and Technical Conference "Special Instrumentation: Status and Prospects" December 4-5, 2018 Kiev.
2. XVIII International Scientific and Technical Conference "Instrument making: the state and prospects" May 15-16, 2019, Kyiv
3. International Scientific and Technical Journal "Scientific News of KPI", issue № 3 2019

Keywords: three-component and four-component zoom-afocal system, synthesis of zoom-afocal lens systems.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	12
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ, ПРИСВЯЧЕНИХ ЛІНЗОВИМ АФОКАЛЬНИМ СИСТЕМАМ.....	15
1.1 Афокальна оптична система.....	15
1.2 Вимоги до афокальних систем.....	18
1.3 Прототипи афокальних систем,їх переваги та недоліки.Огляд афокальний насадок з фіксованим значенням кутового збільшення.....	19
1.3.1 Огляд афокальний насадок з фіксованим значенням кутового збільшення.....	20
1.3.2 Лінзові зум-афокальні системи.....	27
РОЗДІЛ 2 МЕТОД ГАБАРИТНОГО РОЗРАХУНКУЛІНЗОВИХ ТРЬОХ– ТА ЧОТИРЬОХКОМПОНЕНТНИХ ЗУМ - АФОКАЛЬНИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ.....	33
2.1.Дослідженняі розробка методу розрахунку габаритних параметрів трьохкомпонентної зум-афокальної оптичної системи.....	34
2.2 Дослідження і розробка методу розрахунку габаритних параметрів чотирьохкомпонентної зум-афокальної оптичної системи.....	43
2.3. Обґрунтування вибору зум-афокальної оптичної системи.....	52
РОЗДІЛ 3 ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ЗУМ-АФОКАЛЬНОЇ СИСТЕМИ.....	55
3.1 Параметричний синтез з використанням теорії аберацій третього степеневого порядку.....	55

3.2 Метод складання і розв'язання системи рівнянь для корекції сферичної аберації при двох станах зум-афокальної системи с заміною поточних параметрів P_i і W_i основними параметрами компонентів P_i^* і W_i^*	59
3.3 Розв'язання системи рівнянь та розрахунок радіусів лінз зум-афокальної системи.....	65
3.4 Перевірка результатів параметричного синтезу за допомогою програми ZEMAX.....	68
3.5 Конструювання лінз та компоновка афокальної системи.....	74
3.6 Оптимізація афокальної оптичної системи в програмі ZEMAX.....	76
3.7 Відтворення функції напрямних прорізів в циліндрі механізму.....	83
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ЗУМ-АФОКАЛЬНА ЧОТИРЬОХКОМПОНЕНТНА НАСАДКА ДЛЯ ОБ'ЄКТИВІВ ТЕПЛОВІЗОРА».....	88
4.1 Опис ідеї проекту.....	88
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	91
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	92
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	104
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	108
Висновок до розділу.....	112
ВИСНОВОК.....	115
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	117

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

γ - кутове збільшення системи

f'_m – фокусна відстань m компонентів

2ω – кут поля зору оптичної системи

D – діаметр вхідної зіниці оптичної системи

МПФ – модуляційна передавальна функція

I – інваріант Лагранжа Гельмгольца

P_i, W_i – поточні параметри компонентів оптичної системи

P_i^*, W_i^* – основні параметрами компонентів оптичної системи

ФКЕ – функція концентрації енергії

ВСТУП

Сьогодні тепловізори мають широке застосування в різних сферах, найбільш головною є військова. Військові використовують тепловізори для виявлення та розпізнавання об'єктів, що спостерігається, особливо в нічний час.

Але використання тепловізорів на практиці часто потребує зміни масштабу зображення на моніторі. Таку зміну забезпечують або оптичним методом, або використанням відповідних програм масштабування зображень на екрані монітору. Проте оптичний метод дозволяє забезпечувати потрібну роздільну здатність тепловізора при різних кутах його поля зору, без втрати чи зменшенні роздільної здатності.

На даний момент існують тепловізори, які оснащені зум-об'єктивом, але вони мають порівняно високу собівартість і ціну. Через це виникає потреба додання до менш коштовних тепловізорів, із сталим полем зору, оптичної насадки, яка б забезпечувала їм функцію зум-об'єктиву. Такою насадкою може бути пристрій з зум-афокальною оптичною системою.

Зум-афокальна насадка, що перетворює штатний стаціонарний об'єктив у зум-трансфокатор, повинна забезпечувати потрібну зміну кута поля зору, збереження допустимої світлосили у заданих межах, усунення недопустимого він'єтування пучків променів, що надходять від периферійних ділянок поля зору, збереження потрібної якості зображення по всьому полю зору. До того ж зум-афокальна насадка повинна мати найбільш простий закон інескладну механічну систему для переміщень її оптичних компонентів. Одночасне виконання всіх перелічених вимог є непростю науковою та технічною задачею, про що свідчить значна кількість публікацій, присвячених цій тематиці. Тому на сьогодні розробка зум-афокальної оптичної системи додаткових оптичних насадок до тепловізорів із стаціонарними об'єктивами є актуальною задачею.

Метою дисертації є створення оптичної системи насадки до тепловізорів, що забезпечують їм додаткову оптичну зум-функцію.

Предметом дослідження є оптична система лінзової зум-афокальної насадки для зміни кута поля зору штатного стаціонарного об'єктивутепловізора.

При розробці зум-афокальної оптичної системи використовувалися результати досліджень та розробки вітчизняних та зарубіжних вчених у цій сфері, а також результати власних досліджень авторки цієї роботи.

Наукова новизна роботи полягає у створенні теоретичної основи проектування зум-афокальних трикомпонентних та чотирьох компонентних телескопічних систем з винесеною за межі системи апертурною діафрагмою.

Практична значимість даної дисертації полягає в створенні оригінальної оптичної системи афокальної насадки, що забезпечує плавне регулювання кута поля зору тепловізора з відповідним оптичним масштабуванням зображень об'єктів на екрані монітора.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ, ПРИСВЯЧЕНИХ ЛІНЗОВИМ АФОКАЛЬНИМ СИСТЕМАМ

1.1 Афокальна оптична система

Афокальною оптичною системою називається оптична система, яка має безкінечну фокусну відстань, або нульову оптичну силу. Таку систему ще називають телескопічною. До телескопічних оптичних систем належать видошукачі, насадки до об'єктивів фотоапаратів та тепловізорів, далекоміри, пристрої для усунення аберації оптичних систем та інші оптичні пристрої [1].

У телескопічних оптичних системах компоненти розташовані так, що задній фокус першого компонента збігається з переднім фокусом другого компонента, і пучок паралельних променів на вході в систему перетворюється в пучок паралельних променів на виході системи, але з іншим (ніж падаючий пучок променів) нахилом відносно оптичної осі [1].

Афокальна оптична система містить:

- Перший компонент (об'єктив), повернений до спостережуваного об'єкту, і другий компонент (окуляр), повернутий до об'єктиву знімального апарату або ока спостерігача.
- Перший компонент (об'єктив) і другий компонент (окуляр) розташовані так, що передній фокус окуляра суміщений з заднім фокусом об'єктива.

Афокальна оптична система, тобто телескопічна, може бути як дзеркальною, так і лінзовою. Існує два типи телескопічних лінзових систем:

- Система Галілея (рис.1.1) [2]
- Система Кеплера (рис.1.2)[2]

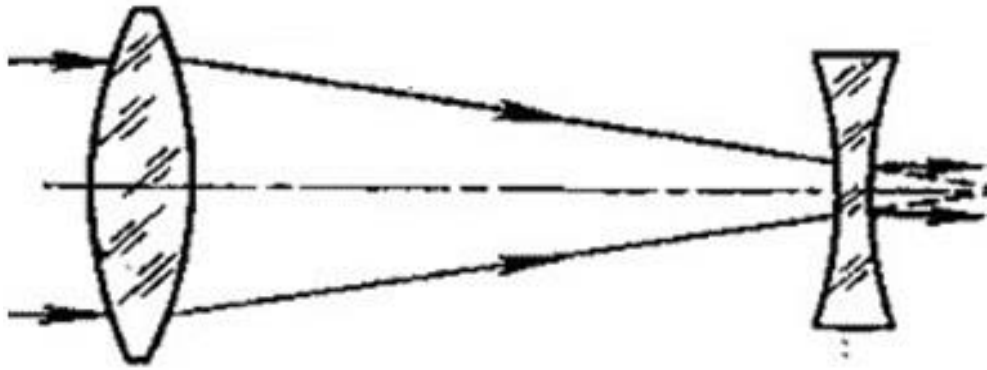


Рис.1.1 Телескопічна система Галілея

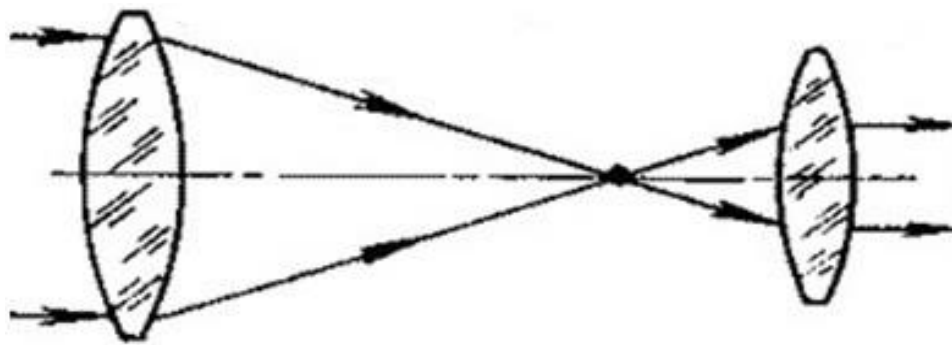


Рис.1.2 Телескопічна система Кеплера

Кожна з цих систем має свої недоліки та переваги. Тому при виборі оптичної системи афокальної насадки, потрібно враховувати всі фактори та вимоги до насадки.

Систему Галілея складається з об'єктива з додатною оптичною силою і окуляра з від'ємною оптичною силою. Вона дає пряме зображення, має малі габарити, але в ній відсутня площина дійсного зображення, через те що задній фокус об'єктива співпадає з уявним переднім фокусом окуляра. Тому використовувати таку систему в вимірювальних приладах не можна[2].

Для системи Галілея, якщо вона використовується в якості афокальної насадки до об'єктиву тепловізора, вхідна зіниця тепловізора стає вихідною зіницею і апертурною діафрагмою для системи Галілея. Через це виникає

істотне він'єтування на краю поля зору, що зростає зі збільшенням кута поля зору.

У зв'язку із зазначеними недоліками система рідко застосовується самостійно і в більшості випадків застосовується як допоміжна система.

Система Кеплера складається з об'єктива і окуляра з додатними оптичними силами. Об'єктив створює перевернуте дійсне зображення в своїй задній фокальній площині, яке можна спостерігати за допомогою окуляра. Дана оптична система має більшу осьову довжину, ніж оптична система Галілея, при чому чим більше збільшення оптичної системи, тим більша її оптична довжина [2].

Загальними для обох оптичних телескопічних систем основними оптичними характеристиками є:

- Видиме збільшення
- Поле зору, яке вимірюється в кутовій мірі²
- Роздільна здатність
- Діаметр вихідної зіниці D та її віддалення від останньої поверхні окуляра t , величина яких залежить від умов в яких буде працювати прилад і виконуючих ним функцій.

Розглянувши більш детально дві телескопічні системи, а саме систему Галілея і систему Кеплера, можна зробити висновок, що кожна із них має свої недоліки та переваги, тому для вибору оптичної системи потрібно детально проаналізувати питання їх придатності до використання в приладі, для якого обирається афокальна система, яким умовам в першу чергу треба задовольнити щоб досягти поставленої мети.

1.2 Вимоги до афокальних систем

Афокальні системи найчастіше використовуються для афокальних насадок тепловізорів, відеокамер, фотокамер та приладів нічного бачення. Афокальні насадки дають можливість змінити кут поля зору та збільшення приладу. Це в свою чергу, дає можливість не змінювати місце положення приладу відносно об'єкту та не змінювати сам прилад на більш кращий.

На даний момент існує декілька типів афокальних насадок по відношенню зміни кута поля зору та збільшення. Перший тип афокальних насадок має фіксоване значення кутового збільшення. Другий тип поступово змінює кутове збільшення і, відповідно, поле зору приладу, в якому вона виконує функцію насадки. Таку афокальну насадку ще називають панкратичною афокальною насадкою.

До кожної афокальної насадки ,незважаючи на її тип, пред'являють специфічні вимоги. Так, як в технічному завданні вказано, що афокальна насадка призначена для тепловізора, то розглянемо основні вимоги афокальних насадок до тепловізорів.

Першою вимогою є те, що робочий спектральний діапазон афокальної насадки не повинен скорочувати робочий спектральний діапазон тепловізора. Тобто, якщо тепловізор без насадки працює в інфрачервоному спектральному діапазоні, то тепловізор з насадкою повинен також працювати в цьому діапазоні.

Другою вимогою до насадки є те , що вона не повинна своєю дією перевертати або робити дзеркальним відносно вертикальної чи горизонтальної осі зображення, що спостерігається в тепловізорі. Мається на увазі, що зображення об'єкта, отримане завдяки тепловізору та тепловізору з насадкою повинно бути одного типу.

Третя вимога, говорить про те, що афокальна насадка не може зменшувати номінальне (без насадки) поле зору тепловізора через він'єтування периферійних, нахилених до осі пучків променів. Це означає, що при роботі тепловізора афокальною насадкою зображення повинно повністю заповнювати екран монітору без істотного зменшення яскравості від центру екрану до його меж.

Аналізуючи афокальну насадку щодо четвертої вимоги то, модуляційна передавальна функція (МПФ) оптичної системи об'єктиву тепловізора з афокальною насадкою не повинна істотно відрізнятися від МПФ самого об'єктиву через дію аберацій насадки або через центральне екранування вхідної зіниці при використанні для роботи насадки дзеркальної телескопічної системи.

Останньою з основних вимог є те, що афокальна насадка не повинна вносити істотне збільшення дисторсії в зображення об'єктів, що спостерігаються через тепловізор.

Дотримуючись основних вимог при виборі та аналізі афокальної насадки можна покращити характеристики тепловізора не змінюючи сам прилад та місце положення об'єкта відносно нього. Дана насадка також покращить та розширить можливості роботи тепловізора.

1.3 Прототипи афокальних систем, їх переваги та недоліки. Огляд афокальний насадок з фіксованим значенням кутового збільшення

На даний момент існує багато різних за конструкцією та призначенням афокальних насадок. Кожна з них має свої переваги та недоліки. Найпростішою оптичною системою таких насадок є система Кеплера та система Галілея. Дані системи уже розглядалися вище, щодо їх недоліків та переваг. Але розглянемо дані системи відповідно до вище зазначених вимог.

1.3.1 Огляд афокальний насадок з фіксованим значенням кутового збільшення

Афокальні насадки, які мають за основу оптичні системи Кеплера та системи Галілея мають невеликі габарити, що є зручним для спостереження наземних об'єктів. Ще однією перевагою даних систем є те, що вони мають невелику кількість конструктивних параметрів, але це є недоліком при корекції аберацій хроматизму та сферичної аберації, які погіршують якість зображення об'єкта, що спостерігається тепловізором.

Оптична система Кеплера, яка зображена на рис.1.3, складається з двох компонентів з додатною оптичною силою, які дають перевернуте зображення об'єкта, що спостерігається [2].

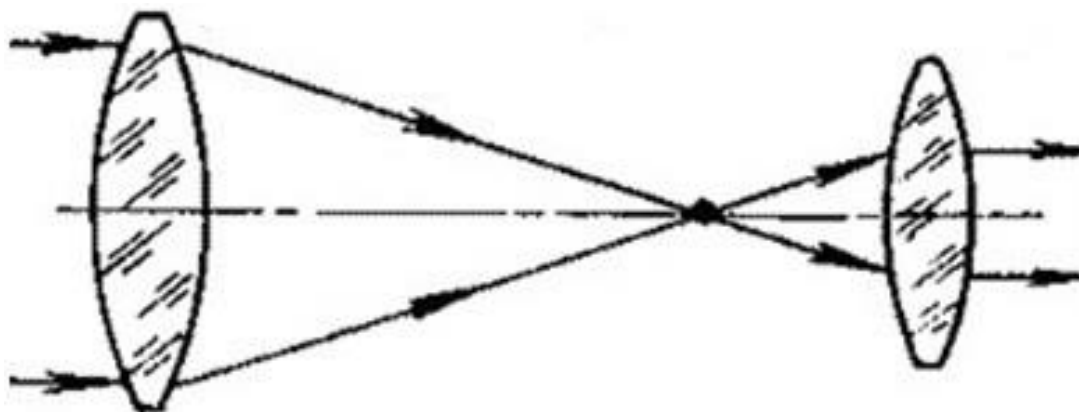


Рис.1.3 Телескопічна система Кеплера

Система Галілея, яка зображена на рис.1.4, також складається з двох лінзових компонентів. Перший компонент має додатну оптичну силу, а другий від'ємну [2].



Рис.1.4 Телескопічна система Галілея

При використанні системи за системою Кеплера зображення є перевернутим, що протирічить першій наведеній вимозі. Це виключає застосування системи Кеплера без подальших її ускладнень. Система Галілея дозволяє мати пряме зображення, до того ж вона коротша у порівнянні з попередньою. Тому її широко застосовують в афокальних насадках. Проте вона має шкідливу властивість він'єтувати периферійні пучки променів і через це обмежувати поле зору тепловізора. Він'єтування виникає через те, що в системі Галілея вихідною зіницею є вхідна зіниця об'єктиву штатного тепловізора, яка винесена за межі системи Галілея. В таких умовах важливе значення має правильний вибір габаритних параметрів компонентів афокальної насадки та її розташування відносно об'єктиву тепловізора

Існують також ускладнені конструкції оптичної системи афокальних насадок. У результаті патентного пошуку було знайдено декілька цікавих прототипів таких насадок, розглянемо кожен з них окремо. Перша оптична система з цих варіантів представлена на рис.1.5[3].

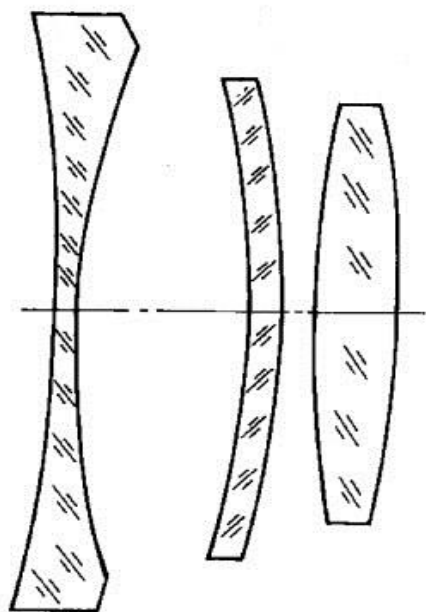


Рис.1.5 Оптична система афокальної насадки

Представлена оптична система афокальної насадки складається з двох компонентів. Перший компонент складається з двох лінз: двояковогнутої лінзи та позитивного або негативного меніска, який повернутий опуклою поверхнею до простору об'єктів. Другий компонент представлений двовипуклою лінзою. Із розгляду патенту на дану оптичну систему можна зробити висновки, що дана оптична система має певні недоліки, а саме:

- система не забезпечує високу якість зображення об'єкта, що спостерігається;
- система не дає достатньої корекції хроматичних аберацій та сферичних аберацій;
- оптична система може мати великі габарити, що є не зручним для афокальної насадки [3].

У патенті [4] представлена оптична система афокальної насадки зображена на рис.1.6.

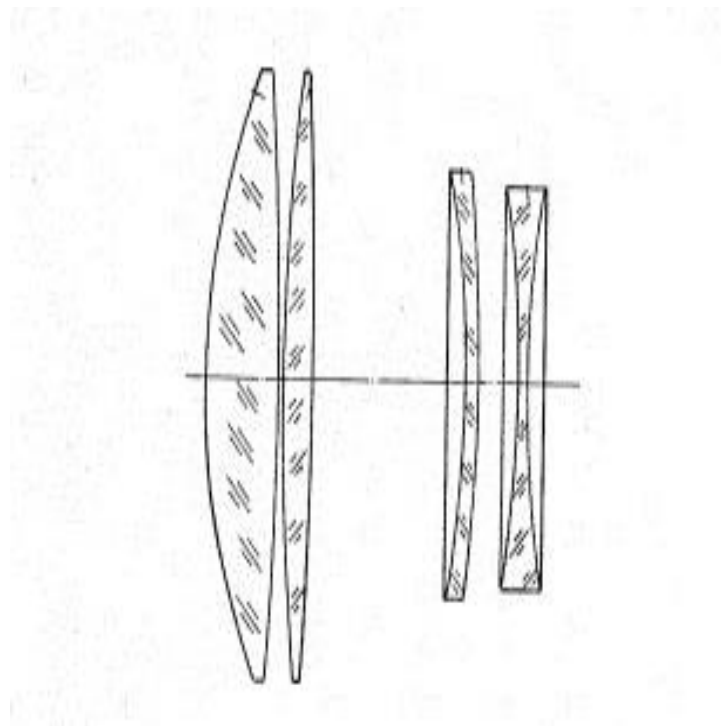


Рис.1.6. Оптична система афокальної насадки

Дана система складається з двох компонентів, які, в свою чергу, складаються з двох лінз. Перший компонент системи представлений двома двовипуклими лінзами, другий – менісками з від'ємною оптичною силою. Ця система може застосовуватися лише при фіксованому кутовому збільшенні [4].

Також дана оптична система буде мати великі габарити афокальної насадки так, як складається з чотирьох лінз. Більша кількість конструктивних параметрів сприяють кращій корекції аберацій, які впливають на якість зображення об'єкта, що спостерігається.

Наступна оптична система представлена в патенті [5] і показана на рис.1.7.

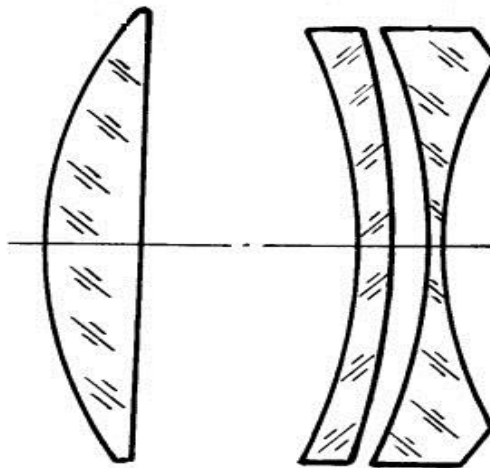


Рис.1.7 Оптична схема трьох лінзової афокальної насадки

Дана оптична система афокальної насадки складається з двох компонентів. Перший компонент складається з одиночної двовипуклої лінзи, другий компонент складається із двох менісків з від'ємною оптичною силою. Ця афокальна насадка змінює фокусну відстань об'єктиву тепловізора без зміни положення площини зображення і збереженні мінімальних значень

остаточних аберацій. Але незважаючи на ці переваги, недоліком даної системи є великі габарити [5].

На рис.1.8 зображено ще один приклад оптичної системи афокальної насадки, вона складається з двох компонентів. Перший і другий компоненти мають від'ємну оптичну силу, третій має додатну оптичну силу. Використання лінзових склейок дозволяє виправляти хроматизм та сферичну аберацію. Протилежні за знаком оптичні сили компонентів дозволяють виправляти кривизну поля та астигматизм [6].

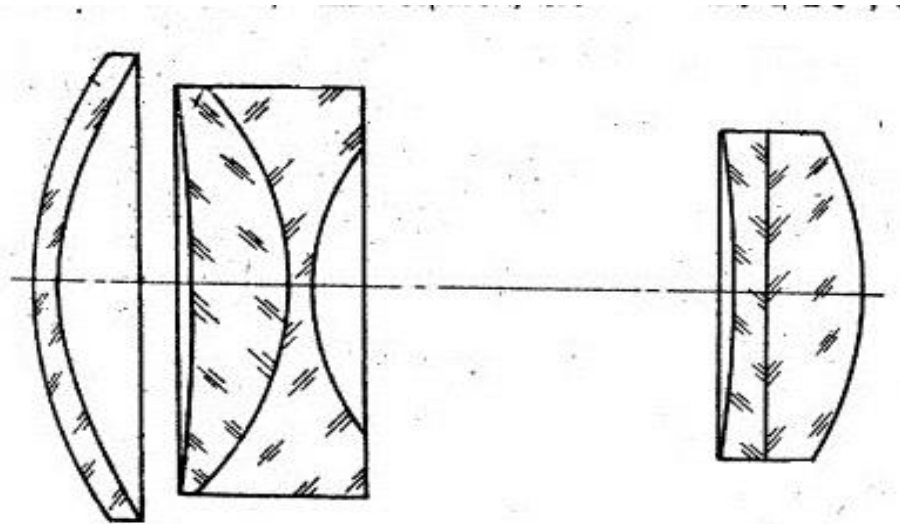


Рис.1.8 Оптична система складної двохкомпонентної афокальної насадки

Недоліком системи є використання оптичних матеріалів для видимого діапазону. Перехід на інфрачервоний діапазон, де номенклатура оптичних матеріалів обмежена, не дозволяє в повній мірі використовувати переваги такої системи.

Для зручності порівняльного аналізу наведених на рис.1.3.-1.8 оптичних систем створена таблиця 1.1 , в якій цифрами 1-5 показані вимоги до афокальної системи:

- Робочий спектральний діапазон афокальної насадки не повинен скорочувати робочий спектральний діапазон тепловізора.
- Афокальна насадка не повинна своєю дією перевертати або робити дзеркальним відносно вертикальної чи горизонтальної осі зображення, що спостерігається в тепловізорі.
- Афокальна насадка не може зменшувати номінальне (без насадки) поля зору тепловізора через він'єтування периферійних, нахилених до осі пучків променів. Це означає, що при роботі тепловізора з афокальною насадкою зображення повинно повністю заповнювати екран монітору без істотного зменшення яскравості від центру екрану до його меж.
- Модуляційна передавальна функція (МПФ) оптичної системи об'єктиву тепловізора з афокальною насадкою не повинна істотно відрізнятися від МПФ самого об'єктиву через дію аберацій насадки або через центральне екранування вхідної зіниці при використанні для роботи насадки дзеркальної телескопічної системи .
- Афокальна насадка не повинна вносити істотне збільшення дисторсії в зображенні об'єктів, що спостерігається через тепловізор.

Таблиця 1.1 Порівняльний аналіз прототипів афокальної насадки до визначених критерій

Номер аналогу	Номер критерію до афокальної насадки				
	1	2	3	4	5
Аналог 1 (рис.1.3)	+				
Аналог 2 (рис.1.4)	+	+		+	+
Аналог 3	+	+			

(рис.1.5)					
Аналог 4 (рис.1.6)	+		+		
Аналог 5 (рис.1.7)	+	+		+	
Аналог 6 (рис.1.8)	+				+

Із аналізу наведених варіантів оптичних систем афокальних насадок можна зробити висновок, що вони більш пристосовані для використання у видимому діапазоні, і всі вони здатні забезпечувати лише фіксоване значення кутового збільшення.

1.3.2 Лінзові зум-афокальні системи

Зум-афокальні системи найчастіше використовуються в трансфокаторах. Вони дають змогу забезпечувати або декілька варіантів зміни кутового збільшення та кута поля зору тепловізора, або навіть панкратичність всієї оптичної системи.

В інформаційному джерелі [7] розглянуто найбільш прості системи зум-афокальних насадок. На рис. 1.9 зображено таку зум-афокальну систему.

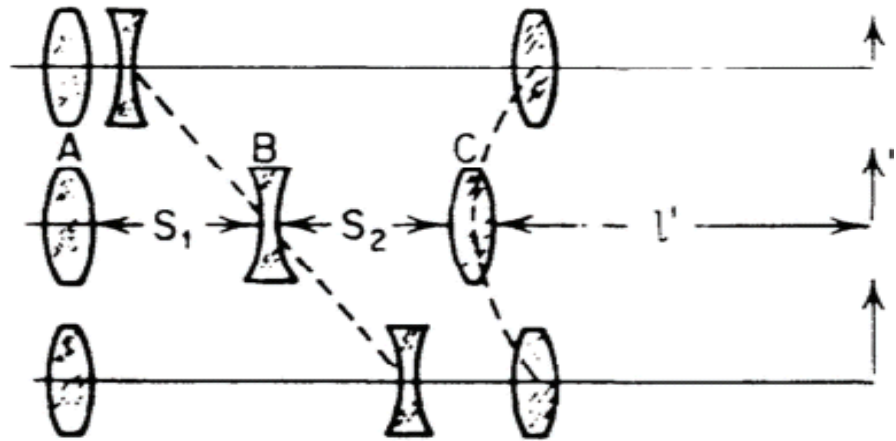


Рис.1.9 Лінзова зум-афокальна система

У даній системі один рухомий компонент забезпечую зміну збільшення (або фокусної відстані), а розфокусування усувається зміщенням одного з інших елементів системи. Хоча ця композиція механічно більш складна, зображення залишається у фокусі у всьому діапазоні збільшення, і цей тип системи має тенденцію до коротшої загальної довжини, ніж оптично компенсований тип [7].

Недоліком такої системи дивлячись на рис.1.9, є те що при зміні положення компонентів змінюються габаритні розміри насадки.

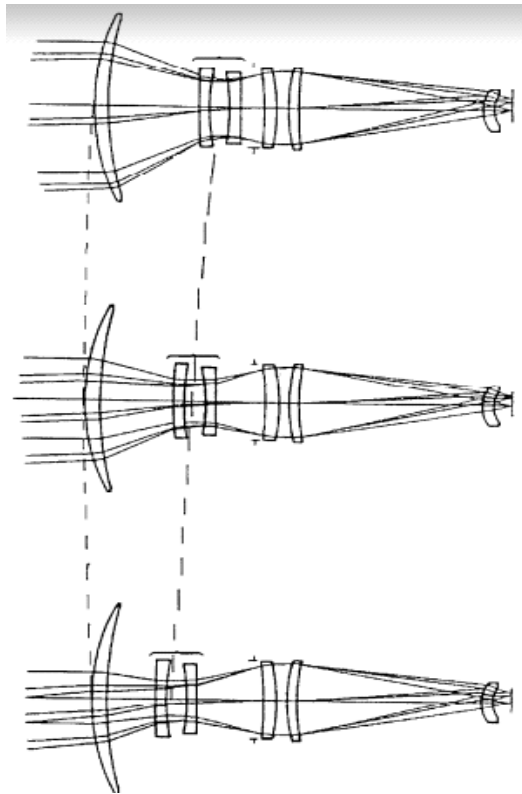


Рис. 1.10 Лінзова зум-афокальна система з чотирьох компонентів компанії Hughes Aircraft Company

Авіакомпанія Hughes Aircraft Company представила лінзову зум-афокальну систему з чотирьох компонентів, яка представлена на рис. 1.10. Для всіх елементів лінзи було обрано германій, оскільки його високий показник заломлення був важливим для мінімізації аберацій. Його низька дисперсність дозволила досягти бажаної корекції хроматизму. Завдяки оптичним характеристикам обраних лінз та конструкції системи корекція аберацій є набагато легшою, чим у попередньому варіанті. Також при аналізі рис.1.10 було виявлено, що при зміні положення рухових компонентів габарити системи не змінюються [7].

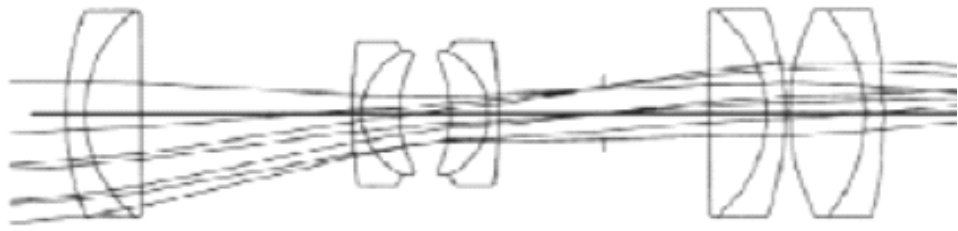


Рис. 1.11 Панкратичний об'єктив з п'яти дублетів

На рис.1.11 показано панкратичну систему в якій перші чотири дублета є афокальною системою, п'ятий дублет фокусує пучок та формує дійсне зображення. Всі дублети є апохроматами, що автоматично корегую хроматизм положення та збільшення. Розташування елементів у послідовності додатній - від'ємний - від'ємний - додатній є підходящим для реалізації широкого діапазону зміни збільшення. У системі останній нерухомий компонент виправляє аберації попередньої частини системи[8].

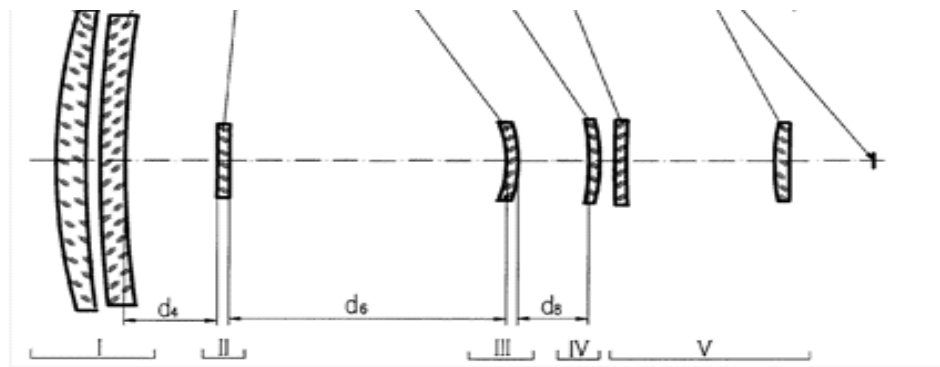


Рис.1.12 П'яти компонентна зум-афокальна система

На рис.1.12 зображено п'яти компонентну зум-афокальну систему, в якій рухомими компонентами є другий та третій компоненти. Недоліком такої системи є те, що система має великі габаритні розміри та невеликий інтервал зміни кута поля зору системи [9].

Компанія Zeiss представила декілька сучасних варіантів зум-афокальних систем, які складаються від трьох компонентів і більше, вони забезпечують декілька варіантів зміни поля зору та збільшення. Такі системи представлені на рис. 1.13 –1.15 [10].

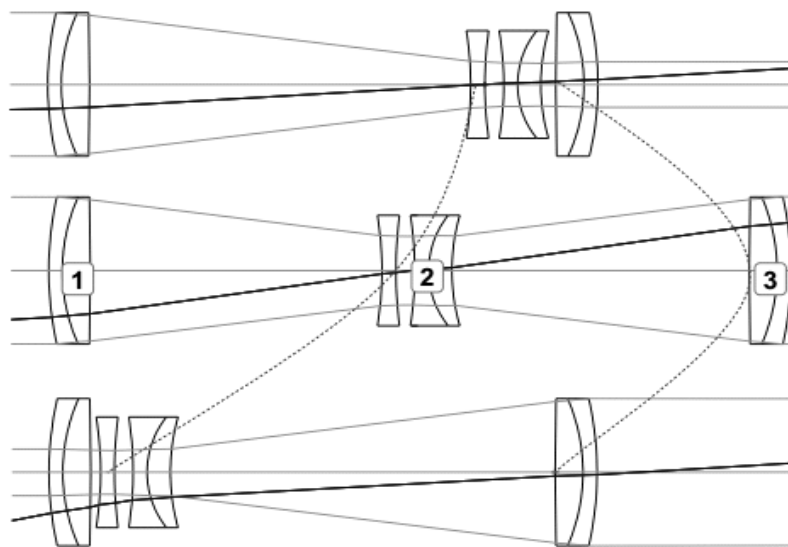


Рис. 1.13 Трьохкомпонентна зум-афокальна система компанії Zeiss

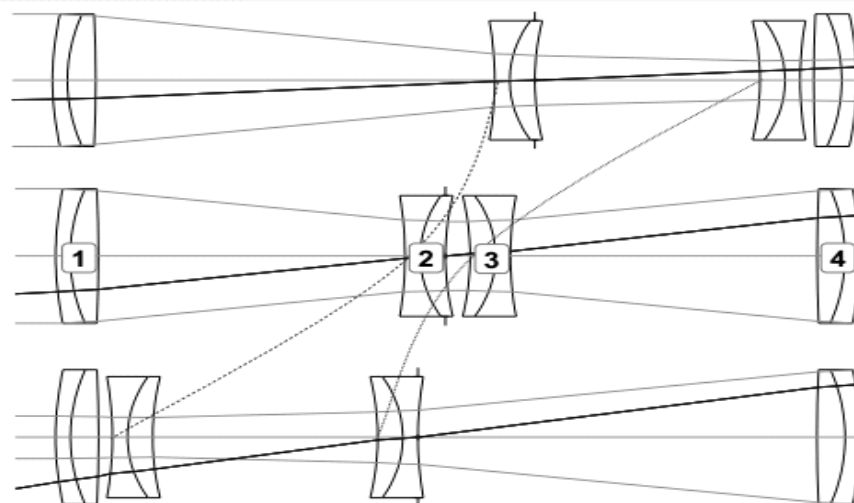


Рис. 1.14 Чотирьохкомпонентна зум-афокальна система компанії Zeiss

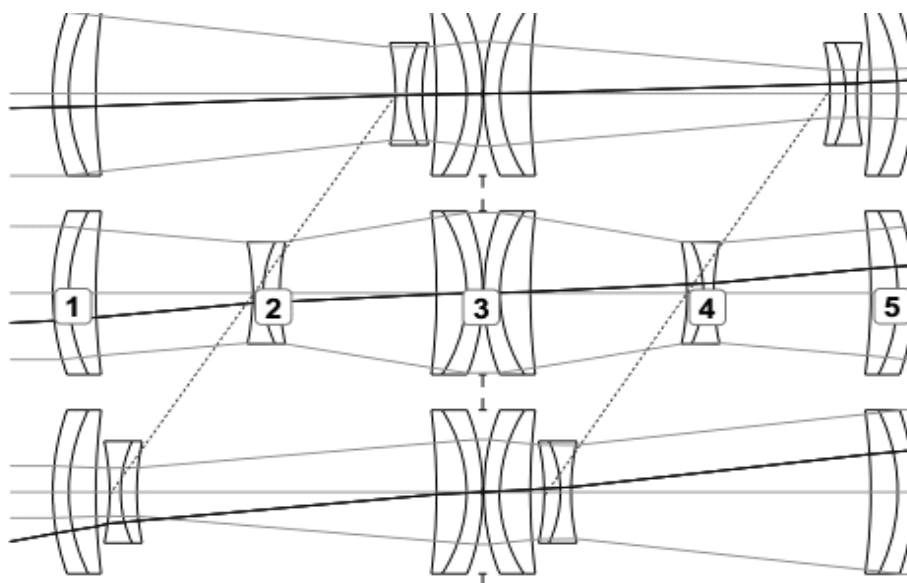


Рис. 1.15 П'ятикомпонентна зум-афокальна система компанії Zeiss

Кожна з систем має компоненти, які переміщуються та забезпечують зміну кута поля зору та збільшення системи. Кожна з систем завдяки своїм компонентам здатна корегувати сферичні аберації, хроматизм та астигматизм, що сприяє досягненню більш якісного зображення об'єкта, що спостерігається.

Проаналізувавши всі зум-афокальні системи та афокальні системи із фіксованою зміною кутового збільшення, можна зробити висновок, що кожна з системи має свої переваги та недоліки. Одним з вагомих недоліків афокальних насадок із фіксованою зміною кутового збільшення є те, що вони потребують механічного переміщення для забезпечення двох положень відносно об'єктиву. При одному положенні афокальна система знаходиться перед об'єктивом, при другому – виводиться в сторону.

Зум-афокальні системи більш зручні у використанні, бо не потребують механічного виведення з оптичної системи об'єктиву. Але вони мають більш складну оптичну систему, потребують механізми внутрішніх прецизійних переміщень компонентів. В трьох компонентній системі при зміні положення рухомих компонентів змінюються і габаритні розміри системи. А це ускладнює конструювання насадки та її використання. При чотирьох та більше

компонентних системах даного недоліку не було виявлено, але вартість та конструкція насадки залежить від кількості елементів в кожному з компонентів.

Всі наведені оптичні системи зум-афокальних насадок спроектовані для випадку внутрішнього розташування апертурної діафрагми. Таке її розташування суттєво спрощує корегування польових аберацій системи, але призводить до такого обмеження поля зору всієї системи через він'єтування нахилених до осі пучків променів, яке є недопустимим. Отже, актуальною є задача розробки такої зум-афокальної системи, яка має винесену за її межі апертурну діафрагму із збереженням при цьому потрібної якості зображення як у всьому діапазоні зміни кутового збільшення, або хоча б при декількох фіксованих значеннях кутового збільшення.

РОЗДІЛ 2 МЕТОД ГАБАРИТНОГО РОЗРАХУНКУ ЛІНЗОВИХ ТРЬОХ- ТА ЧОТИРЬОХ КОМПОНЕНТНИХ ЗУМ - АФОКАЛЬНИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

У попередньому розділі було розглянуто прототипи зум-афокальних насадок. Найбільш сучасними та більш ефективними є варіанти афокальних оптичних систем компанії ZEISS (рис.1.13–1.15). Але в цих варіантах апертурна діафрагма знаходиться в межах оптичної системи між компонентами. При використанні афокальної системи як частини трансфокатора, в якому стаціонарний об'єктив своєю апертурною діафрагмою обмежує пучки променів, неможливо розмістити апертурну діафрагму між компонентами афокальної системи. Тому виникає задача дослідження впливу на габаритні, оптичні та абераційні параметри афокальної системи зовнішнього розташування апертурної діафрагми, а точніше за межами системи позаду її.

Результати вказаного дослідження повинні стати основою для ескізного проектування афокальної системи. Вихідними даними для габаритного розрахунку повинні бути осьова довжина афокальної системи, діапазон чи дискретні значення її кутового збільшення, розміри поля зору, розташування та діаметр апертурної діафрагми або вхідної зіниці стаціонарного об'єктиву, допустиме він'єтування пучків променів, що надходять в систему від краю поля зору.

Із розгляду прототипів компанії ZEISS витікає висновок про те, що найбільш придатними до створення зум-афокальних систем є трьох- та чотирьохкомпонентні системи. Тому задачею даного розділу є створення алгоритму габаритного розрахунку трикомпонентних та чотирьохкомпонентних лінзових зум-афокальних оптичних систем з винесеною за їх межі вихідною зіницею, яка дозволяє задовольняти вимогам до її зовнішніх параметрів і отримувати габаритні параметри компонентів,

що також сприятимуть досягненню позитивних результатів проведення наступного абераційного синтезу системи.

проведення

2.1. Дослідження методу розрахунку габаритних параметрів трьохкомпонентної афокальної оптичної системи

розробка

зум-

Зум-афокальні оптичні системи мають забезпечувати плавну зміну кутового збільшення γ_{var} в діапазоні від γ до γ^{-1} , де γ – одне з двох крайніх значень γ_{var} . Це дає можливість мати γ^2 - кратність зміни кутового розміру поля зору оптичного приладу, оснащеного стаціонарним об'єктивом з зум-афокальною насадкою. На рис.2.1 в тонких компонентах показана оптична система трикомпонентної афокальної системи, яка при вказаному на рисунку симетричному розташуванні компонентів забезпечує проміжне значення кутового збільшення $\gamma = 1$ [21].

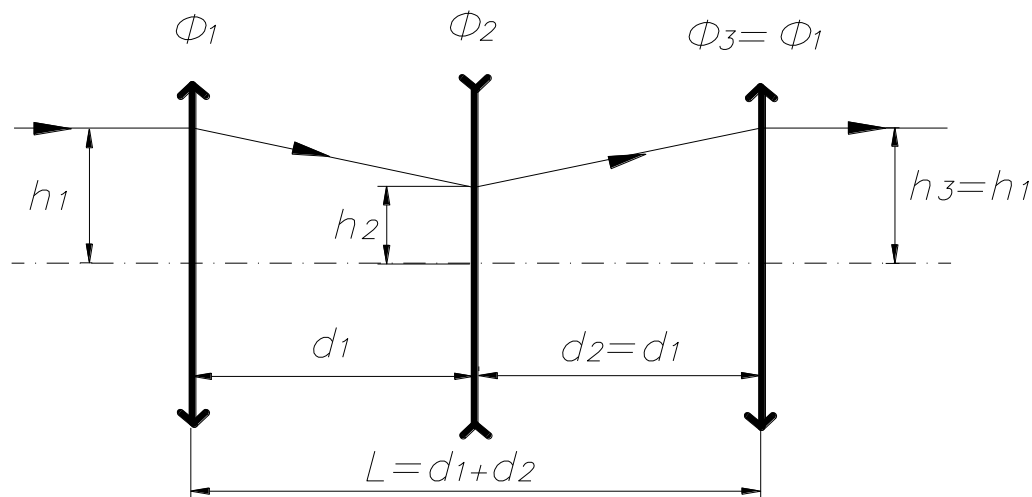


Рис.2.1 Зум-афокальна симетрична система при кутовому збільшенні $\gamma = 1$

При цьому прилад із стаціонарним об'єктивом і показаною на рис.1 афокальною системою має зображення і кутовий розмір поля зору 2ω , який він має без афокальної насадки. Те, що $\Phi_1 = \Phi_3$, а $d_1 = d_2$ означає симетричність системи, при цьому висота нульового променя $h_3 = h_1$. Якщо система є

афокальною, то її оптична сила $\Phi = 0$. Згідно [2] оптична сила багатокомпонентної оптичної системи:

$$\Phi = h_1\Phi_1 + h_2\Phi_2 + h_3\Phi_3 = 0 \quad (2.1)$$

Так як нульовий промінь заходить в систему паралельно оптичній осі, то висота $h_2 = h_1(1 - d_1\Phi_1)$. Після підстановки висот h_1, h_2, h_3 в (2.1) отримуємо рівняння $2\Phi_1 + \Phi_2 - d_1\Phi_1\Phi_2 = 0$, з якого [21]:

$$d_1 = \frac{2\Phi_1 + \Phi_2}{\Phi_1\Phi_2} = \frac{2}{\Phi_2} + \frac{1}{\Phi_1} = 2f_2' + f_1',$$

де f_1' – фокусна відстань крайніх компонентів, а f_2' – фокусна відстань середнього компонента. Осьова довжина L афокальної системи при цьому:

$$L = 2d_1 = 2f_1' + 4f_2'. \quad (2.2)$$

Вираз (2.2) показує, що значення $\gamma = 1$ можна отримати при будь якому співвідношенні $k = \frac{f_1'}{f_2'} = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}$, але для зменшення осьової довжини L фокусні відстані f_1', f_2' повинні мати протилежні знаки. Так при $f_1' = -2f_2'$, ($k = -2$), афокальна система згідно (2.2) теоретично отримує мінімальну нульову осьову довжину. Тому у подальшому будемо аналізувати афокальні трикомпонентні системи з протилежними значеннями фокусних відстаней f_1', f_2' , тобто при від'ємних значеннях коефіцієнта k [21].

Для досягнення більших значень γ другий компонент переміщується вправо, як показано на рис.2.2, а для менших значень γ середній компонент повинен переміщуватися від центру вліво. При зміні відстаней d_1, d_2 потрібно, щоб зберігалася телескопічність системи з прямим зображенням – система галілеєвського типу. Перший компонент в такій системі буде виконувати

функцію об'єктиву, а другий і третій компоненти разом – функцію окуляру вказаної телескопічної системи [21].

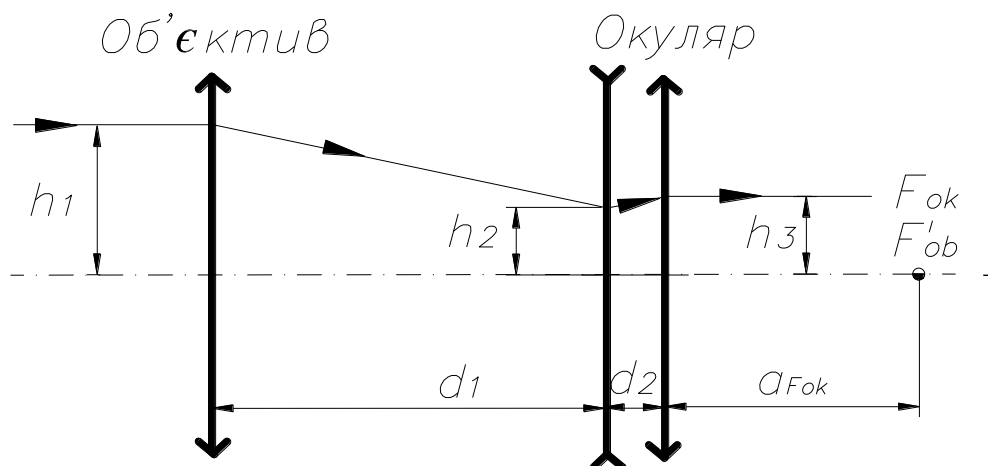


Рис. 2.2 Зум-афокальна система при кутовому збільшенні $\gamma > 1$

При цьому оптична сила об'єктиву $\Phi_{об} = \Phi_1$, а оптична сила окуляру $\Phi_{ок} = \Phi_2 + \Phi_3 - d_2 \Phi_2 \Phi_3$. Так як $\Phi_3 = \Phi_1$, то $\Phi_{ок} = \Phi_2 + \Phi_1 - d_2 \Phi_2 \Phi_1$.

Тоді кутове збільшення γ показаної на рис.2.2 системи визначається відношенням $\gamma = -\frac{f'_{об}}{f'_{ок}} = -\frac{\Phi_{ок}}{\Phi_{об}} = -\frac{\Phi_2 + \Phi_1 - d_2 \Phi_2 \Phi_1}{\Phi_1} = -(1 + k - d_2 \Phi_2)$, звідки осьова відстань :

$$d_2 = \frac{1 + k + \gamma}{\Phi_2}. \quad (2.3)$$

Вираз (2.3) показує, що при $\Phi_2 < 0$ і $d_2 > 0$ чисельник $1 + k + \gamma < 0$, а коефіцієнт $k < -(1 + \gamma)$. Так, наприклад, при потрібному максимальному значенні $\gamma = 3$ коефіцієнт k може приймати тільки значення $k < -4$ [21].

Для забезпечення афокальній системі виду, характерного для телескопічної системи Галілея, потрібно щоб дійсний задній фокус об'єктиву був суміщеним з уявним переднім фокусом окуляру, який знаходиться за окуляром. Ця умова виконується, коли :

$$d_1^* + a_{F_{OK}} = f'_{об} = f'_1, \quad (2.4)$$

де $a_{F_{OK}}$ – передній фокальний відрізок окуляру.

$$\text{Згідно [2] та при } \Phi_3 = \Phi_1 a_{F_{OK}} = f_{OK} (1 - d_2 \Phi_3) = f_{OK} (1 - d_2 \Phi_1), \quad \text{а}$$

$$f_{OK} = -\Phi_{OK}^{-1} = -(\Phi_1 + \Phi_2 - d_2 \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2)^{-1}, \quad \text{звідки } a_{F_{OK}} = -\frac{1 - d_2 \Phi_1}{\Phi_1 + \Phi_2 - d_2 \Phi_1 \Phi_2}. \quad \text{Після}$$

підстановки виразу $a_{F_{OK}}$ у рівняння (2.4) і відповідних перетворень отримуємо формулу:

$$d_1 = \frac{1}{\Phi_2} \left(k + \frac{k - d_2 \Phi_2}{1 + k - d_2 \Phi_2} \right) \quad (2.5)$$

При цьому загальна осьова довжина зум-афокальної системи з виразів (2.3) та (2.5):

$$L(k, \gamma) = d_1 + d_2 = \frac{1}{\Phi_2} \left(1 + 2k + \gamma + \frac{1 + \gamma}{\gamma} \right) \quad (2.6)$$

Вираз (2.6) свідчить про те, що осьова довжина такої системи не є сталою при зміні значень γ та k . Вона прямо пропорційна коефіцієнту k , але нелінійно залежить від значення γ . При $\gamma = 1$ функція $L(\gamma)$ отримує максимальне значення:

$$L_{\max} = \frac{2}{\Phi_2} (2 + k) = 2(2 + k) f'_2 \quad (2.7)$$

Отриманий вираз дає можливість при габаритному розрахунку зум-афокальної системи визначати потрібні значення Φ_2 і Φ_1 , або f'_2 і f'_1 , якщо у вихідних даних на проектування такої системи вказані допустиме значення L_{\max} та граничне максимальне значення γ . При цьому коефіцієнт k повинен задовольняти вищевказаній умові $k < -(1 + \gamma)$.

Характер зміни кожного з відрізків d_1 , d_2 та їх суми при варіації значення γ показано графіками на рис. 2.3, на якому максимальне значення $L(\gamma)$ нормовано до одиниці, а значення γ змінюється в інтервалі від 3^{-1} до 3, забезпечуючи 9-кратну зміну поля зору трансфокатору з даною зум-

афокальною насадкою. Графіки на рис.2.3 показують, що відстань d_2 між середнім та останнім компонентами лінійно пов'язана із значенням γ . Тому для переміщення середнього компоненту вздовж оптичної осі потребується найпростіший лінійний механізм. Проте залежність $d_1(\gamma)$ явно нелінійна, а тому для першого компоненту потребується більш складний механізм переміщень. Характерним є й той факт, що на краях діапазону зміни γ осьова довжина зум-афокальної системи має мінімальне значення. До того ж має місце рівняння $L(\gamma) = L(\gamma^{-1})$, який свідчить про віртуальний поворот афокальної системи на 180° [21].

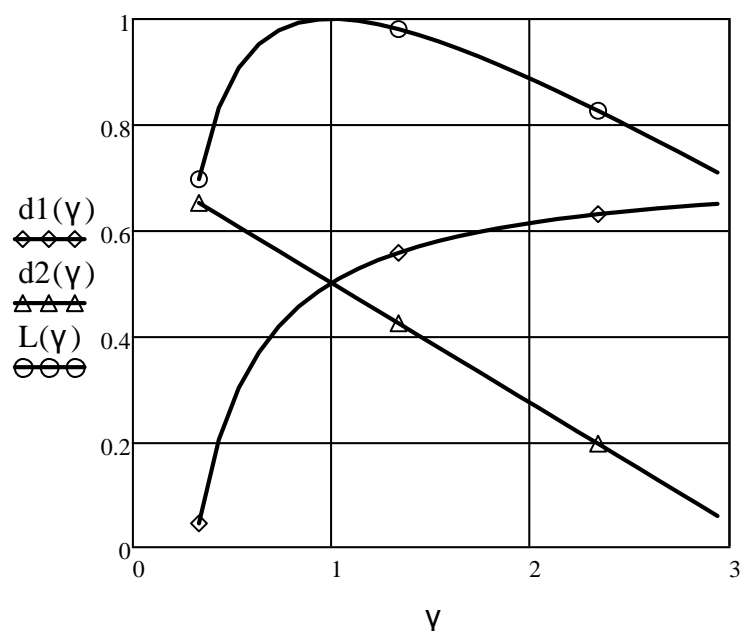


Рис.2.3 Нормовані графіки залежності взаємного положення компонентів та осьової довжини зум-афокальної системи від зміни значень кутового збільшення γ

При габаритному розрахунку оптичної системи зум-афокальної насадки окрім поздовжніх відрізків потрібно визначати світлові діаметри її компонентів, які істотно впливають на розміри поля зору та обмеження потоків випромінювання, які надходять в стаціонарний об'єктив. Що стосується поля

зору, то в телескопічній системі Галілея не може бути польової діафрагми, а тому воно обмежується тільки він'єтувальними діафрагмами. Такими діафрагмами є оправи лінзових компонентів зум-афокальної системи [21].

Він'єтувальні діафрагми не повинні обмежувати поле зору стаціонарного об'єктиву, з яким афокальна насадка утворює трансфокатор. На потрібні розміри цих діафрагм також впливає той фактор, що апертурною діафрагмою трансфокатора є апертурна діафрагма стаціонарного об'єктиву. Вхідна зіниця цього об'єктиву знаходиться за зум-афокальною насадкою, як показано на рис.2.4, що призводить до збільшення світлових діаметрів компонентів насадки. Задачею розрахунку поперечних габаритів компонентів зум-афокальної насадки є збереження розмірів поля зору 2ω стаціонарного об'єктиву у всьому заданому діапазоні значень γ при забезпеченні допустимого він'єтування пучків променів, що надходять в систему від країв поля зору [21].

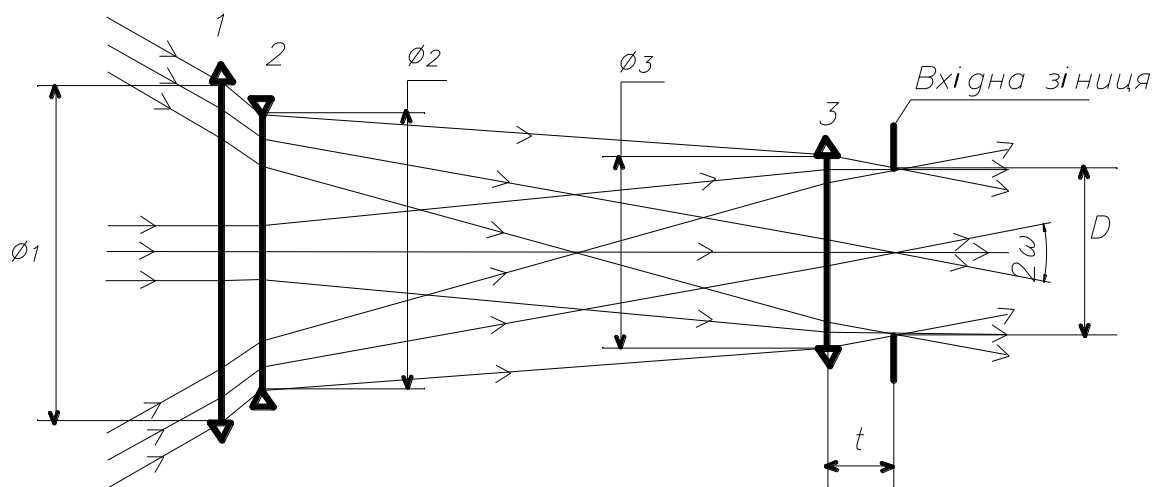


Рис.2.4 До габаритного розрахунку світлових діаметрів $\varnothing_1, \varnothing_2, \varnothing_3$

Для розрахунку світлових діаметрів $\varnothing_1, \varnothing_2, \varnothing_3$ компонентів афокальної системи потрібні додаткові дані про:

- 2ω – кут поля зору стаціонарного об'єктиву,
- D – діаметр вхідної зіниці стаціонарного об'єктиву,

- t – відрізок, показаний на рис.2.4, що вказує розташування вхідної зіниці відносно останнього компонента афокальної системи, та
- k_{ω} – допустиме значення коефіцієнту в'єтування пучка променів, що надходить в афокальну систему від краю поля зору.

Розрахунок вказаних світлових діаметрів можна здійснити за допомогою формул висот та кутів нульового променя [10], який обирається відповідно до вказаного значення k_{ω} . Якщо потрібно мати $k_{\omega}=1$, то необхідно розрахувати висотина компонентах променя, що надходить в афокальну систему через верхній край отвору першого компонента, рис.2.4 і належить верхньому крайньому нахиленому пучку. Подвоєні значення висот такого променя на всіх компонентах афокальної системи дорівнюють їх світловим діаметрам. Нижче наведені формули розрахунку діаметрів $\varnothing_1, \varnothing_2, \varnothing_3$, отримані у такій спосіб при $k_{\omega}=1$:

$$\varnothing_1 = 2[bt - d_1 - d_2 + d_1d_2\Phi_2]tg\omega + bD; \quad (2.8)$$

$$\varnothing_2 = 2(ta - d_2)tg\omega + aD; \quad (2.9)$$

$$\varnothing_3 = 2ttg\omega + D, \quad (2.10)$$

де $a = 1 - d_2\Phi_1$; $b = a - d_1(\Phi_1 + a\Phi_2)$.

У випадку необхідності розрахувати світлові діаметри компонентів при допустимому значенні коефіцієнту в'єтування $k_{\omega}=0,5$ достатньо здійснити розрахунок ходу променя, який є середнім в пучку, що надходить через край першого компоненту і проходить через осьову точку вхідної зіниці (див. рис.2.4). При вказаному значенні k_{ω} такий розрахунок можна здійснити за формулами (2.8) – (2.9), з підстановкою в них значення $D=0$, які перетворюються до вигляду:

$$\varnothing_1 = 2[bt - d_1 - d_2 + d_1d_2\Phi_2]tg\omega; \quad (2.11)$$

$$\varnothing_2 = 2(ta - d_2) \operatorname{tg} \omega; \quad (2.12)$$

$$\varnothing_3 = 2t \operatorname{tg} \omega. \quad (2.13)$$

На рис.2.5, рис.2.6 в якості прикладу показані графіки функцій $\varnothing_1(\gamma)$, $\varnothing_2(\gamma)$, $\varnothing_3(\gamma)$, отримані за формулами (2.8), (2.9), (2.10), для зум-афокальної системи з максимальною осьовою довжиною $L_{\max} = 100 \text{ мм}$, $\gamma \in [0.333...3]$, $k = -4.2$, $t = 10 \text{ мм}$, $D = 20 \text{ мм}$,

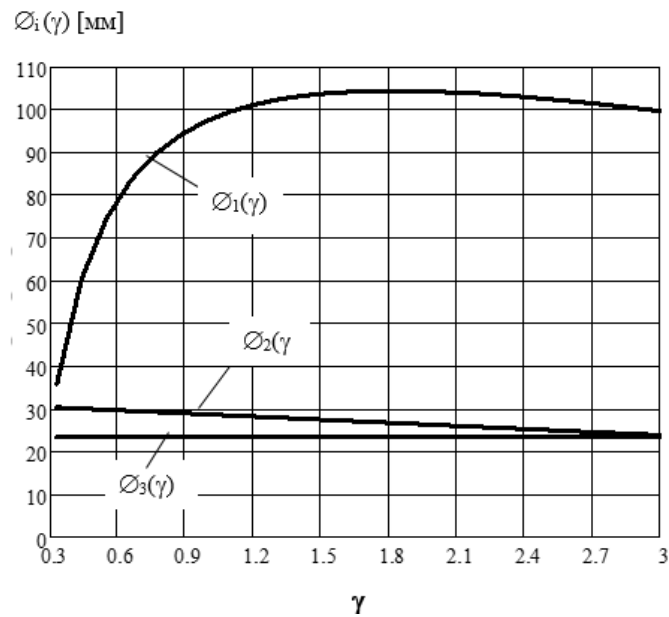


Рис.2.5 Графіки функцій $\varnothing_1(\gamma)$, $\varnothing_2(\gamma)$, $\varnothing_3(\gamma)$ при $k_\omega = 1$

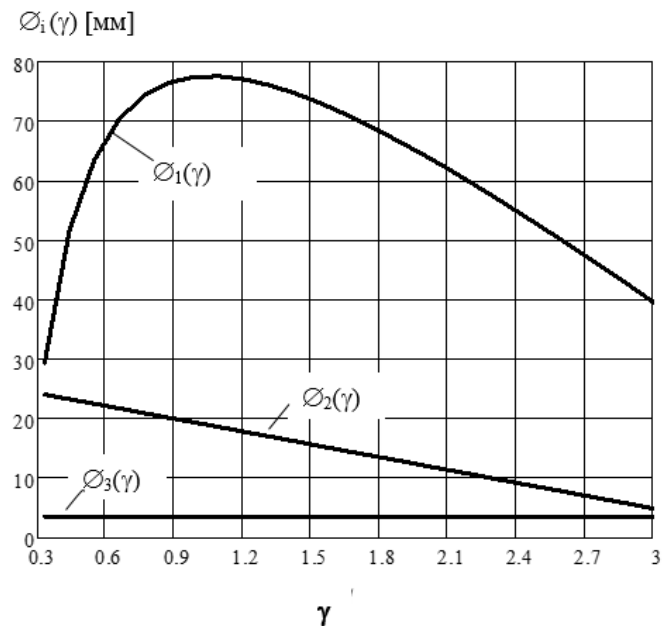


Рис.2.6 Графіки функцій $\phi_1(\gamma)$, $\phi_2(\gamma)$, $\phi_3(\gamma)$ при $k_\omega = 0.5$

Наведені на рис.2.5 графіки дають уяву про розміри світлових діаметрів компонентів, при яких він'єтування відсутнє на всьому заданому діапазоні зміни кутового збільшення γ . Графіки на рис.2.6 також демонструють потрібні світлові діаметри компонентів при допустимому значенні $k_\omega = 0.5$.

Зрозуміло, що при визначенні діаметрів компонентів за цими графіками потрібно вибирати ті їх розміри, які в робочому діапазоні значень γ мають найбільші значення. Так згідно графіків на рис.2.5 при $k_\omega = 1$ перший компонент повинен мати світловий діаметр 105 мм, другий – 30,5 мм, третій – 23.5 мм

Згідно графіків на рис.2.6 при $k_\omega = 0.5$ перший компонент не повинен мати світловий діаметр менший ніж 78 мм, другий – 24 мм, третій – 3.5 мм.

Графіки, представлені на рис.2.5 та рис.2.6 при необхідності дозволяють обмежити діапазон зміни кутового збільшення, або виключити із практичного застосування окремі ділянки цього діапазону якщо поперечні габарити першого компоненту на цих ділянках виходять за допустимі значення. Як висновок, можна сказати, що:

1. Запропонований алгоритм габаритного розрахунку зум-афокальної трикомпонентної оптичної системи дозволяє отримувати дані про оптичні параметри її компонентів, закон їх переміщень вздовж оптичної осі використовуючи вимоги дозовнішніх габаритів зум-афокальної трикомпонентної системи, потрібного діапазону зміни її кутового збільшення та розмірів поля зору.

2. Знайдені залежності світлових діаметрів компонентів афокальної системи від діапазону зміни кутового збільшення надають можливість встановлювати реальні межизміни кутового збільшення з урахуванням вимог до допустимого він'єтування позаосьових пучків променів та обмежень на габарити системи.

3. Алгоритм габаритного розрахунку дозволяє у подальшому реалізувати комп'ютеризовану автоматизацію проектування афокальної системи.

4. Наступним напрямком розвитку теорії проектування зум-афокальних систем слід вважати розробку алгоритму абераційного синтезу компонентів вказаних системи [21].

2.2 Дослідження і розробка методу розрахунку габаритних параметрів чотирьохкомпонентної зум-афокальної оптичної системи

На рис.2.7 в тонких компонентах показана чотирьохкомпонентна афокальна оптична система, яка при вказаному нарисунку симетричному розташуванні компонентів забезпечує проміжне значення кутового збільшення $\gamma = 1$. Функцію апертурної діафрагми такої системи виконує вхідна зіниця об'єктиву, що входить у склад трансфокатора.

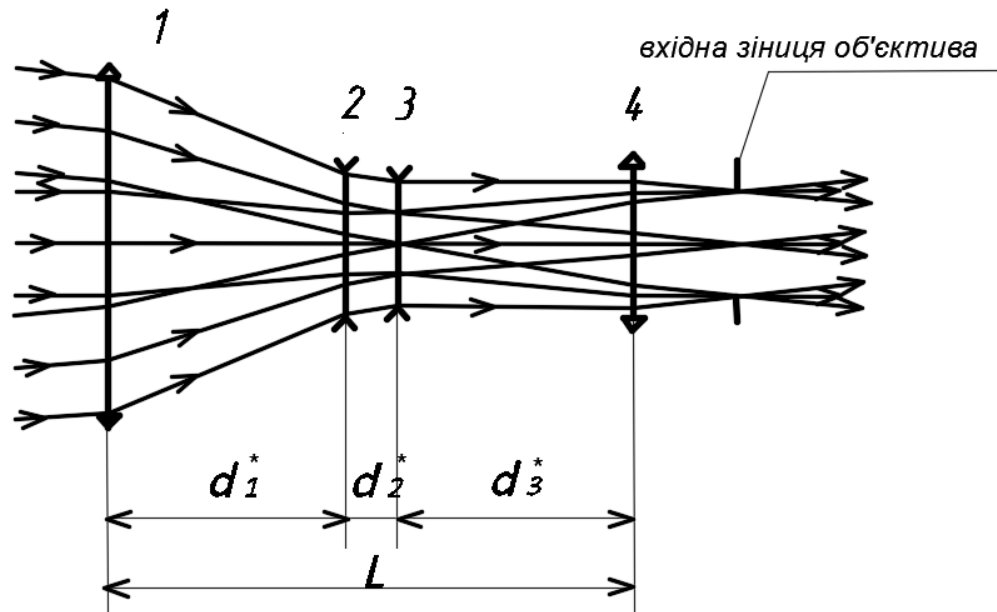


Рис.2.7 Чотирьохкомпонентна сум-афокальна оптична система при кутовому збільшенні $\gamma = 1$

Показана на рис.2.7 афокальна система на вході та на виході має кут поля зору 2ω , рівний куту поля зору об'єктива. Симетричність системи означає, що оптичні сили компонентів та осьові відрізки на рис.1 знаходяться у співвідношеннях: $\Phi_1 = \Phi_4$, $\Phi_2 = \Phi_3$, $d_1^* = d_3^*$.

У стані, показаному на рис.2.7, компоненти 1 та 2 а також 3 та 4 утворюють однакові телескопічні системи, повернуті одна до одної на 180° . Тоді відносно системи з компонентів 1 та 2, як телескопічної системи, вірним є рівняння:

$$f_1' + f_2' = \frac{1}{\Phi_1} + \frac{1}{\Phi_2} = d_1^* = \frac{L - d_2^*}{2},$$

де f_1' , f_2' – задні фокусні відстані першого та другого компонентів відповідно, Φ_1 , Φ_2 – оптичні сили тих самих компонентів.

Якщо оптичні сили вказаних компонентів мають співвідношення $\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = k$,

то :

$$\Phi_1 = \frac{k+1}{k} \frac{2}{L-d_2^*} = \frac{2(k+1)}{k(L-d_2^*)} \quad (2.14)$$

$$\Phi_2 = k\Phi_1 = \frac{2(k+1)}{L-d_2^*} \quad (2.15)$$

При значеннях кутового збільшення $\gamma \neq 1$ оптична система має інше розташування компонентів, яке для прикладу показано на рис.2.8.

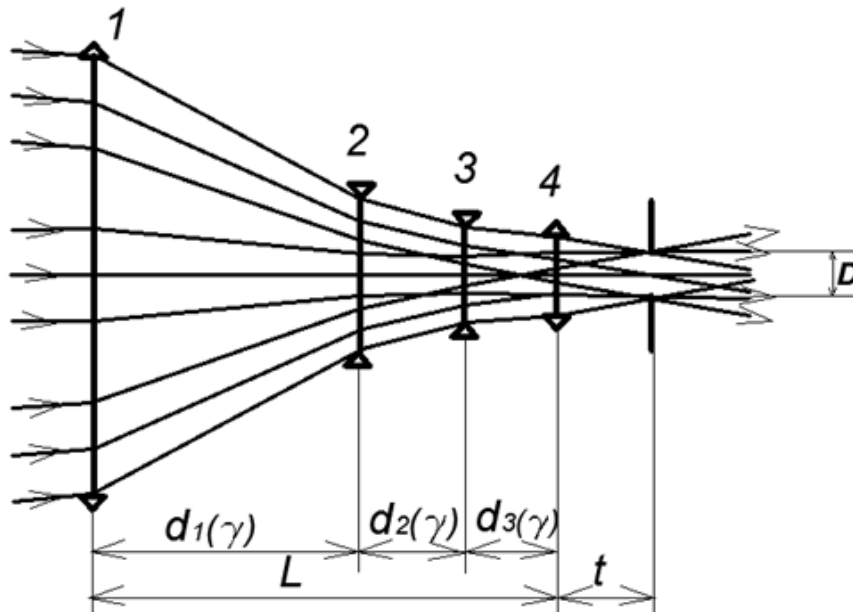


Рис.2.8 Чотирьохкомпонентна сум-афокальна система при $\gamma \neq 1$

Для збереження афокальною системою властивості телескопічної системи галілеєвського типу для забезпечення прямого зображення потрібно виконання наступних умов:

- 1) перша група компонентів, наприклад із компонентів 1 і 2, утворює об'єктив телескопічної системи, а інша, друга група із компонентів 3 і 4 утворює окуляр з протилежною за знаком оптичною силою;
- 2) задній фокус об'єктиву F'_{ob} повинен бути суміщеним із переднім фокусом F_{ok} окуляру;

3) відношення задньої фокусної відстаней об'єктиву до задньої фокусної відстані окуляру дорівнює заданому кутовому збільшенню γ афокальної системи.

Оптична сила об'єктиву $\Phi_{ob} = \Phi_1 + \Phi_2 - d_1\Phi_1\Phi_2$, оптична сила окуляру $\Phi_{ok} = \Phi_3 + \Phi_4 - d_3\Phi_3\Phi_4 = \Phi_2 + \Phi_1 - d_3\Phi_2\Phi_1$, при цьому умова 3) має математичний вираз:

$$\frac{f'_{ob}}{f'_{ok}} = \frac{\Phi_{ok}}{\Phi_{ob}} = \frac{\Phi_1 + \Phi_2 - d_3\Phi_1\Phi_2}{\Phi_1 + \Phi_2 - d_1\Phi_1\Phi_2} = -\gamma,$$

який з урахуванням того, що $\Phi_2 = k\Phi_1$, та $d_3 = L - d_1 - d_2$ отримує вигляд:

$$1 + k - (L - d_1 - d_2)k\Phi_1 = -\gamma(1 + k - d_1k\Phi_1) \quad (2.16)$$

Для виконання умови 2) потрібно, щоб фокальні відрізки об'єктиву $a'_{F'ob}$ та окуляру a_{Fok} і відстань d_2 знаходилися у співвідношенні:

$$a'_{F'ob} = d_2 + a_{Fok} \quad (2.17)$$

Фокальні відрізки $a'_{F'ob}$, a_{Fok} двохкомпонентних систем розраховуються за формулами:

$$a'_{F'ob} = f'_{ob}(1 - \Phi_1d_1) = \frac{1 - \Phi_1d_1}{\Phi_1(1 + k - d_1k\Phi_1)},$$

$$a_{Fok} = f_{ok}(1 - \Phi_4d_3) = \frac{1 - \Phi_1d_3}{-\Phi_1(1 + k - d_3k\Phi_1)}.$$

Після підстановки останніх виразів у (2.17), та враховуючи, що $d_3 = L - d_1 - d_2$, маємо вираз:

$$d_2\Phi_1 = \frac{1 - \Phi_1d_1}{(1 + k - d_1k\Phi_1)} + \frac{1 - \Phi_1(L - d_1 - d_2)}{1 + k - (L - d_1 - d_2)k\Phi_1} \quad (2.18)$$

Вирази (2.16) та (2.18) утворюють систему рівнянь, в якій відстані d_1 та d_2 є невідомими. Розв'язання вказаної системи рівнянь при заданих величинах L та k показує, що відстань $d_3 = L - d_1 - d_2$, яка не може мати від'ємні значення, обмежує можливий діапазон кутового збільшення γ зум-афокальної системи.

На рис.2.9 для прикладу показані графіки залежності відстані $d_3(\gamma, k)$, отримані при $d_2^* = 10$ мм $L = 100$ мм для двох значень k , які демонструють максимальні значення γ , в той момент коли d_3 досягає нульового значення. Так при $k = -1.5$ $\gamma_{\max} = 2.2$, а при $k = -2.5$ $\gamma_{\max} = 6.4$.

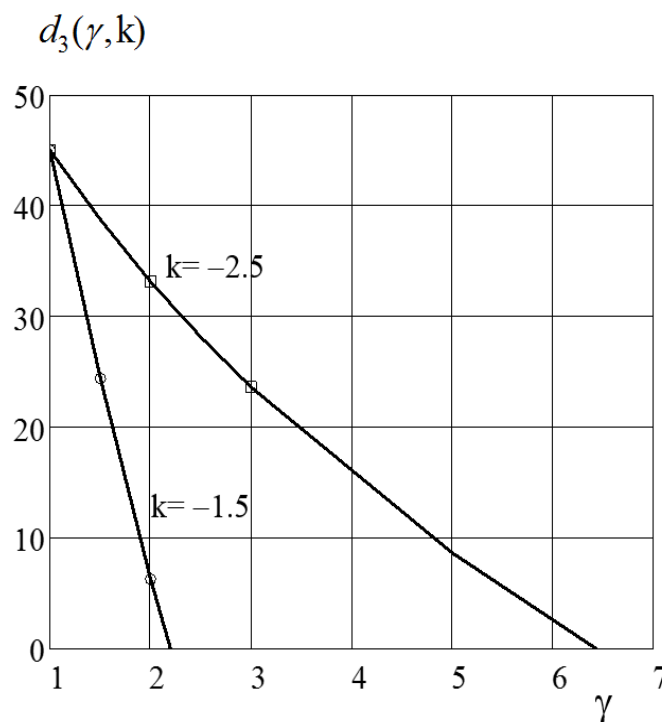


Рис.2.9 Графіки залежності відстані між компонентом 3 та 4 від кутового збільшення γ та коефіцієнта k

Для пошуку виразу, який дозволяє визначати γ_{\max} при заданих значеннях k , використаємо рівняння (3) при умові, що $d_3 = L - d_1 - d_2 = 0$, тоді:

$$\gamma_{\max} = -\frac{1+k}{1+k-d_1 k \Phi_1} \quad (2.19)$$

У формулі (2.19) невідомою є величина d_1 , яку можна знайти із розв'язання рівняння (2.18) після підстановки в нього $\Phi_1 = \frac{2(k+1)}{k(L-d_2^*)}$ та $d_3 = L - d_1 - d_2 = 0$, з чого $d_2 = L - d_1$. В результаті отримаємо рівняння відносно невідомої величини d_1 :

$$ad_1^2 + bd_1 + c = 0 \quad (2.20)$$

$$\text{де: } a = (1+k)k\Phi_1^2, \quad b = \left\{ 2k+1 - (1+k)[k\Phi_1 L + (1+k)] \right\} \Phi_1,$$

$$c = L\Phi_1(1+k)^2 - 2(1+k).$$

Прийнятним коренем рівняння (2.20) є:

$$d_1 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2.21)$$

На рис.2.10 для прикладу показані графіки функції $\gamma_{\max}(k)$, розраховані з використанням формул (6), (7), (8) при $L = 100\text{ мм}$ та двох значеннях d_2^* .

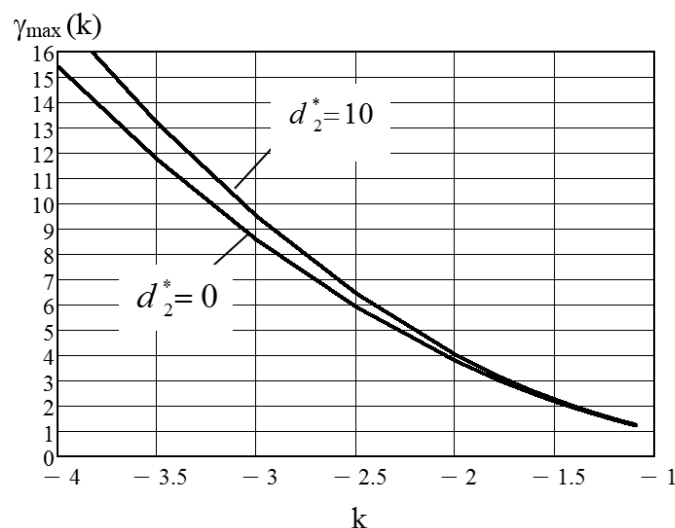


Рис.2.10 Графіки залежності максимального значення кутового збільшення від коефіцієнта k

Ці графіки дозволяють знаходити значення коефіцієнта k , виходячи з потрібного значення γ_{\max} . Так, наприклад, для забезпечення $\gamma_{\max} = 3$ при $d_2^* = 10$ мм необхідно мати $k = -1.75$. Значення цього коефіцієнту у свою чергу дозволяє за допомогою формул (2.14) та (2.15) розрахувати оптичні сили і фокусні відстані компонентів зум-афокальної системи, а потім на цій основі, використовуючи систему рівнянь, складену із виразів (2.16) та (2.18), знайти функції $d_1(\gamma)$, $d_2(\gamma)$ та $d_3(\gamma) = L - d_1(\gamma) - d_2(\gamma)$ в діапазоні γ від γ_{\max}^{-1} до γ_{\max} .

На рис. 2.11 представлені графіки функцій $d_1(\gamma)$, $d_2(\gamma)$, $d_3(\gamma)$ отримані у вище викладений спосіб для діапазону $\gamma \in [0.333 \div 3]$ при $k = -1.75$.

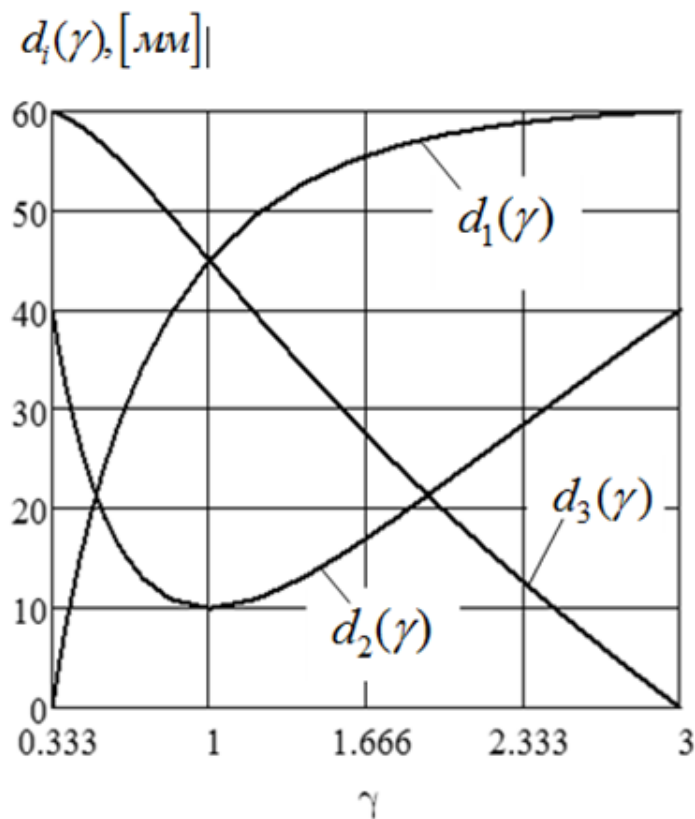


Рис. 2.11 Графіки відстаней між компонентами як функції кутового збільшення γ зум-афокальної системи при $L=100$ мм та $d_2^*=10$ мм

Наведені на рис. 2.11 графіки свідчать про те, що в діапазоні $\gamma \in [1 \div 3]$ відносно найбільша нелінійність спостерігається у функції $d_1(\gamma)$, а функції $d_2(\gamma)$ та $d_3(\gamma)$ майже лінійні, що спрощує виготовлення та функціонування механізму переміщень цих компонентів. Найбільша нелінійність вказаних функцій спостерігається на ділянці $\gamma \in [0.333 \div 1]$, якоможе бути не обов'язковою для застосування у трансфокаторі.

Отримані результати дають можливість визначати світлові діаметри компонентів зум-афокальної системи у всьому заданому діапазоні кутового збільшення γ . Для цього достатньо скористатися формулами кутів та висот нульового променя, який проходить через всю афокальну систему і виходить із неї через край вихідної зіниці (або апертурної діафрагми) під кутом ω – половини кутового поля зору стаціонарного об'єктиву. Подвійні висоти такого променя дорівнюють світловим діаметрам компонентів, при яких забезпечується відсутність він'єтування променів по всьому заданому полю зору.

Незалежним від кутового збільшення є лише світловий діаметр останнього четвертого компоненту:

$$\varnothing_4 = D + 2t \cdot \operatorname{tg}(\omega), \quad (2.22)$$

де параметр D – діаметр вихідної зіниці (апертурної діафрагми), t – відрізок, що вказує положення вихідної зіниці відносно четвертого компоненту, рис.2.8.

Світлові діаметри інших компонентів розраховуються за формулами:

$$\varnothing_3(\gamma) = \varnothing_4 - 2d_3(\gamma)[\operatorname{tg}(\omega) + 0.5\varnothing_4\Phi_1], \quad (2.23)$$

$$\varnothing_2(\gamma) = \varnothing_3(\gamma) - 2d_2(\gamma)[\operatorname{tg}(\omega) + 0.5(\varnothing_4\Phi_1 + \varnothing_3(\gamma)\Phi_2)], \quad (2.24)$$

$$\varnothing_1(\gamma) = \varnothing_2(\gamma) - 2d_1(\gamma)[\operatorname{tg}(\omega) + 0.5(\varnothing_4\Phi_1 + \varnothing_3(\gamma)\Phi_2 + \varnothing_2(\gamma)\Phi_2)]. \quad (2.25)$$

Формули (2.22) – (2.25) також дозволяють розрахувати світлові діаметри компонентів при допустимому коефіцієнті він'єтування крайнього пучка променів $k_{\omega}=0.5$. Для цього розрахунки за цими формулами потрібно здійснити при $D=0$.

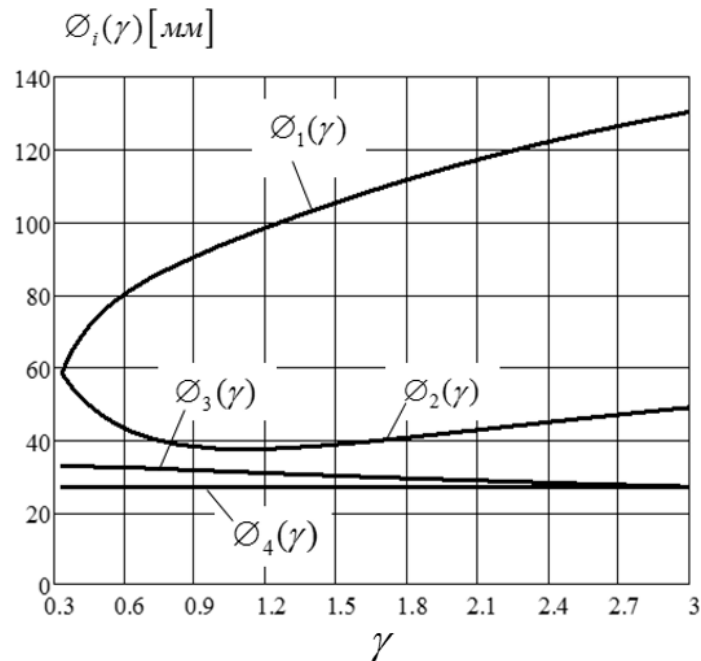


Рис. 2.12 Графіки залежності світлових діаметрів компонентів від кутового збільшення γ зум-афокальної системи при $L=100$ мм, $f'_1=f'_4=105$ мм, $f'_2=f'_3=-60$ мм, $D=20$ мм, $2\omega=20^\circ$, $t=20$ мм, $k=-1.75$, $d_2^*=10$ мм.

З наведених графіків видно, що найбільшого світлового діаметру потребує перший компонент. Але аналогічні розрахунки для випадку $k_{\omega}=0.5$ показують що цей діаметр зменшується у два рази і складає 65 мм.

Як висновок, можна твердити, що:

1. Розроблений метод габаритного розрахунку зум-афокальної чотирьохкомпонентної оптичної системи дозволяє отримувати дані про оптичні та геометричні параметри її компонентів і закони їх переміщень вздовж

оптичної осі на основі вимог до потрібного діапазону зміни кутового збільшення, розмірів поля зору, діаметру та віддаленості вихідної зіниці.

2. Знайдені залежності світлових діаметрів компонентів афокальної системи від зміни кутового збільшення вказують на те, що відносні отвори її компонентів є порівняльно меншими у порівнянні з подібною трикомпонентною системою. До того ж ці залежності надають можливість встановлювати реальний діапазон значень кутового збільшення з урахуванням вимог до допустимого він'єтування позаосьових пучків променів та обмежень на поперечні габарити системи.

3. Порівняно з трикомпонентною зум-афокальною системою чотирьохкомпонентній властиві більш прийнятні закони переміщень компонентів з огляду на те, що відстань між першим та четвертим компонентами є незмінною, а другий і третій компоненти в діапазоні $\gamma \geq 1$ мають майже лінійний закон переміщень у меншому інтервалі їх переміщень.

4. Алгоритм габаритного розрахунку дозволяє у подальшому реалізувати комп'ютеризовану автоматизацію проектування чотирьохкомпонентної зум-афокальної системи.

5. Наступним напрямком розвитку теорії проектування чотирьохкомпонентної зум-афокальних систем із зовнішнім розташування вихідної зіниці слід вважати розробку алгоритму абераційного синтезу компонентів вказаних системи.

2.3. Обґрунтування вибору зум-афокальної оптичної системи

Для вибору зум-афокальної системи важливими умовами є:

1. Більша простота механізму переміщень рухомих компонентів.
2. Менші значення відносних отворів окремих компонентів системи.
3. Менші поперечні габарити системи.
4. Менша нелінійність законів переміщення компонентів.

Використовуючи результати досліджень в пунктах 2.1 -2.2 робимо порівняльний аналіз системи. Для порівняльного аналізу системи

розглядаються в однакових умовах їх функціонування та приймаються наступні вихідні дані:

- осьова довжина – 100мм;
- діапазон зміни кутового збільшення $\gamma \in [1...3]$;
- поле зору в просторі зображень (за афокальною системою) $2\omega = 20^\circ$;
- апертурна діафрагма знаходиться за системою на відстані $t = 10$ мм;
- діаметр апертурної діафрагми $D = 20$ мм.

При вказаних вихідних даних коефіцієнт k трикомпонентної системи згідно нерівностей (2.8–2.10) має значення $k = -4.2$, а чотирьохкомпонентна система згідно виразу (2.19) та графіку (2.12) має значення $k = -1.75$.

Тоді трикомпонентна система згідно формул має фокусні відстані

$$f'_1 = f'_3 = 95.45 \text{ мм, а } f'_2 = -22.72 \text{ мм.}$$

Чотирьохкомпонентна система згідно виразів має фокусні відстані компонентів першого та четвертого $f'_1 = f'_4 = 105$ мм, і фокусні відстані другого та третього компонентів $f'_2 = f'_3 = -60$ мм.

При значенні коефіцієнту він'єтування крайнього по полю пучка променів k_ω трикомпонентна система згідно графіка рис.2.6 має найбільші значення світлових діаметрів $D_{i\max}$ компонентів, та найбільшого значення відносного отвору $(D_{i\max} : f'_i)$, щопоказані в лівій частині таблиці 2.1. Для цього використовувалися графіки на рис.2.6 та рис.2.12.

У правій частині таблиці 2.1 представлені найбільші значення світлових діаметрів та відносних отворів компонентів чотирьохкомпонентної афокальної системи, знайдені з використанням графіків на рис.2.6 та рис. 2.12.

Табл. 2.1 Порівняння відносних отворів компонентів

№ компон.	Трикомпонентна афокальна система	Чотирьохкомпонентна афокальна система
1	$f_1' = 95.45 \text{ мм}; D_{1\text{max}} = 105 \text{ мм};$ $D_{1\text{max}} : f_1' = 1.1$	$f_1' = 105 \text{ мм}; D_{1\text{max}} = 130.5 \text{ мм}$ (при $\gamma = 3$); $D_{1\text{max}} : f_1' = 1.24$
2	$f_2' = -22.72 \text{ мм}; D_{2\text{max}} = 30 \text{ мм}$ (при $\gamma = 1$); $D_{2\text{max}} : f_2' = 1.32$	$f_2' = -60 \text{ мм}; D_{2\text{max}} = 48.9 \text{ мм}$ (при $\gamma = 3$); $D_{2\text{max}} : f_2' = 0.82$
3	$f_3' = 95.45; D_{3\text{max}} = 23 \text{ мм};$ $D_{3\text{max}} : f_3' = 0.24$	$f_3' = -60 \text{ мм}; D_{3\text{max}} =$ $31.3 \text{ мм (при } \gamma = 1); D_{3\text{max}} : f_3' =$ 0.52
4		$f_4' = 105 \text{ мм}; D_{4\text{max}} = 27.05 \text{ мм}$ $D_{4\text{max}} : f_4' = 0.26$

Як видно з наведеного у табл. 2.1 найбільші значення відносних отворів компонентів трикомпонентної та чотирьохкомпонентної системи відрізняються суттєво. Найбільшого значення цього параметру досягає другий компонент трикомпонентної системи. Трохи менше значення відносного отвору має перший компонент чотирьохкомпонентної афокальної системи. Обидва наведені значення відносних отворів свідчать про те, що для їх зменшення необхідним стане послаблення вимоги щодо допустимого значення коефіцієнту він'єсування k_ω .

На основі вищевикладеного порівняння відносних отворів компонентів можна вважати, що перевага все ж належить чотирьохкомпонентній системі, яка до того, на відміну від трикомпонентної, має сталу відстань між першим та останнім четвертим компонентом.

РОЗДІЛ 3 ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ЗУМ-АФОКАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Параметричний синтез з використанням теорії аберацій третього степеневого порядку

Основною задачею параметричного синтезу зум-афокальної системи є пошук номінальних значень конструктивних параметрів системи, при яких система задовольняє вимогам технічного завдання. В якості тепловізійної камери, для якого синтезується зум-афокальна система, обрана модель ThermalEyeTSC, рис. 3.1. Вона має матричний приймач випромінювання у вигляді болометричної матриці 160 на 120 пікселів розміром 30х30 мкм і обладнана об'єктивом з фокусною відстанню 17 мм, що разом забезпечує кут поля зору приладу 17°х12°.



Рис. 3.1 Тепловізійна камера ThermalEyeTSC

Зум-афокальна система повинна мати:

1. Осьову довжину не більше 100 мм і забезпечувати трикратну зміну кута поля зору для камери – від 17° до 5.67° : кут поля зору $2\omega = 17^\circ$ при кутовому збільшенні $\gamma = 1$ та кут поля зору $2\omega = 5.67^\circ$ при $\gamma = 3$.
2. RMS-радіусспот-діаграми від точки на осі пучка та від точки на краю поля зору – не більше 30 мкм.
3. Значення МПФ на просторовій частоті 17 ліній/мм від точки на осі та від точки на краю поля зору – не менше 0.5.
4. Діаметр вхідної зіниці штатного об'єктиву тепловізора 20 мм.
5. Вхідна зіниця штатного об'єктиву виконує функцію апертурної діафрагми або вихідної зіниці афокальної системи, яка розташована на відстані 10 мм від останнього компоненту афокальної системи.

У попередньому розділі було досліджено два варіанти зум-афокальної системи, які можуть задовольнити вимоги технічного завдання. Але було визначено, що чотирьохкомпонентна система має більше переваг, тому параметричний синтез буде зроблено саме цієї системи.

Параметричний синтез буде проводитися з використанням теорії аберацій третього степеневих порядку за методом Г.Г. Слюсарєва, з використанням основних параметрів P^* та W^* компонентів, шляхом розв'язання абераційних рівнянь відносно цих параметрів. Практична значимість теорії і методу полягає в тому, що вона дозволяє отримувати значення конструктивних параметрів оптичної системи і одночасно здійснювати аналіз загальних абераційних властивостей досліджуваної системи.

Як відомо, теорія монохроматичних аберацій третього степеневих порядку демонструє наявність п'яти незалежних типів аберацій, які представляються п'ятьма сумами Зейделя, кожна з яких кількісно характеризує кожен тип аберацій.

Оптична система, представлена тонкими компонентами, має наступні вирази сум Зейделя сферичної аберації, коми, астигматизму, кривизни поля, дисторсії відповідно [2]:

$$S_I = \sum_{k=1}^{k=p} h_k P_k \quad (3.1)$$

$$S_{II} = \sum_{k=1}^{k=p} H_k P_k - I \sum_{k=1}^{k=p} W_k \quad (3.2)$$

$$S_{III} = \sum_{k=1}^{k=p} \frac{H_k}{h_k} P_k - 2I \sum_{k=1}^{k=p} \frac{H_k}{h_k} W_k + I^2 \sum_{k=1}^{k=p} \left(\frac{\delta(\alpha_k \mu_k)}{h_k} \right) \quad (3.3)$$

$$S_{IV} = - \sum_{k=1}^{k=p} \left(\frac{\delta \mu_k}{r_k} \right)^2 \quad (3.4)$$

$$S_V = \sum \frac{H_k^2}{h_k^2} P_k - \sum 3I \frac{H_k^2}{h_k^2} W_k + \sum I^2 \frac{H_k}{h_k} (3 + \pi_k) \Phi_k \quad (3.5)$$

де h_k – висота першого нульового допоміжного променя на відповідному компоненті;

H_k – висота другого нульового допоміжного променя на відповідному компоненті;

$I = -f'$ – інваріант Лагранжа Гельмгольца афокальної системи разом з штатним об'єктивом тепловізора;

$$\delta(\alpha_k \mu_k) = \alpha_{k+1} \mu_{k+1} - \alpha_k \mu_k ;$$

$$\mu_k = \mu_{k+1} = 1 \text{ (бо всі оптичні середовища між компонентами – повітря)}$$

Афокальна насадка повинна в першу чергу бути коригована на сферичну аберацію, а потім на кому, тобто мати властивості апланатичної системи. Проте на початковій стадії синтезу доцільно виправити сферичну аберацію, оцінити стан аберації коми системи і, при необхідності, вирішувати наступну задачу виправлення коми.

На рис. 3.1–3.2 представлена у тонких компонентах у двох станах, а саме коли кутове збільшення $\gamma = 1$ і $\gamma = 3$, 4-х компонентна афокальна система разом із штатним об'єктивом тепловізора.

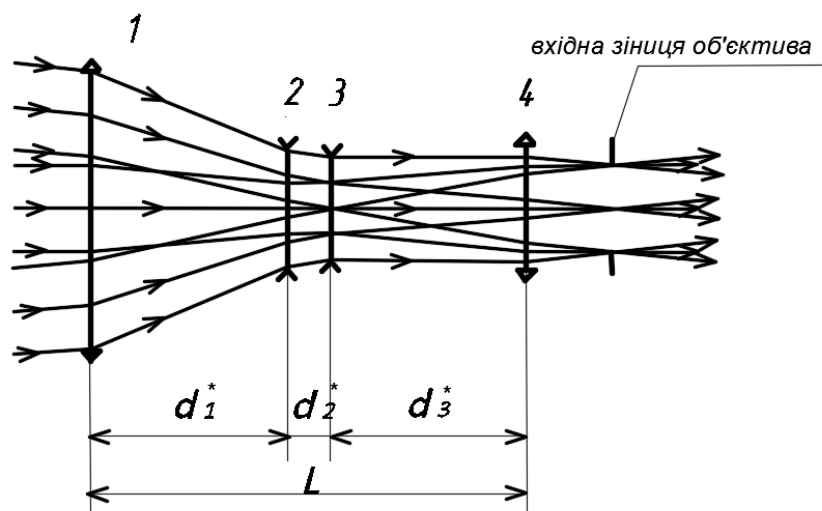


Рис.3.1 Чотирьохкомпонентна сум-афокальна система при $\gamma = 1$

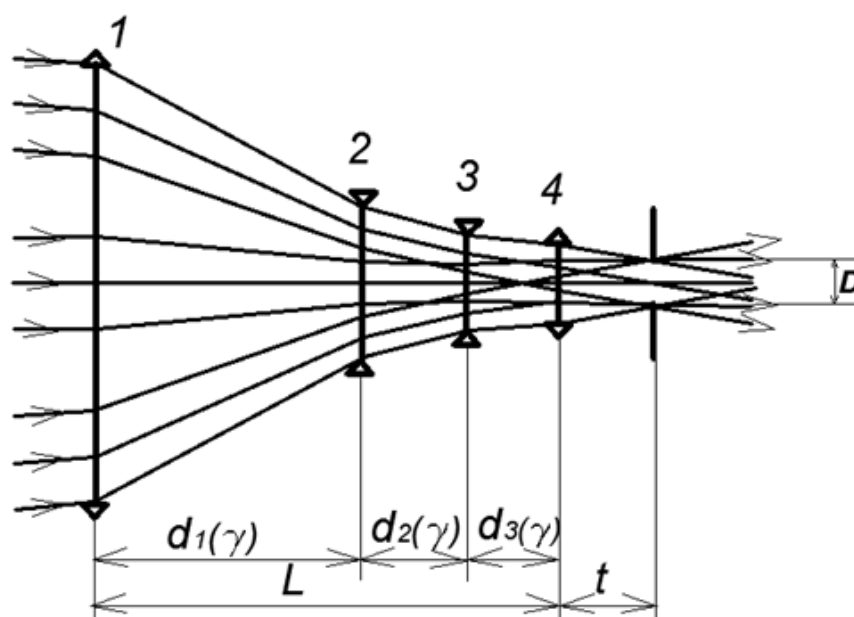


Рис.3.2 Чотирьохкомпонентна сум-афокальна система при $\gamma \neq 1$

3.2 Метод складання і розв'язання системи рівнянь для корекції сферичної аберації при двох станах зум-афокальної системи заміною поточних параметрів P_i і W_i основними параметрами компонентів P_i^* і W_i^*

Щоб скласти рівняння для першої суми Зейделя спочатку розрахуємо хід через афокальну систему хід першого допоміжного нульового променя, висоти якого h_k входять в формулу вказаної суми Зейделя, яка визначає сферичну аберацію. Розрахунок ходу променя здійснюємо для двох станів системи, коли $\gamma=1$ і коли $\gamma=3$, використовуючи для цього відомі формули висот і кутів нульового променя [2]:

$$\begin{aligned}\alpha_{k+1} &= \alpha_k + h_k \Phi_k \\ h_{k+1} &= h_k - d_k \alpha_{k+1}\end{aligned} \quad (3.6)$$

Початковими параметрами нульового променя є наступні:

$\alpha_1 = 0$, $h_1 = f'$, де f' - задня фокусна відстань афокальної системи разом з штатним об'єктивом, якій на даній стадії синтезу представляється теж тонким компонентом із заданою фокусною відстанню $f' = 17$ мм.

Кожний з двох станів афокальної системи + об'єктив має своє значення фокусної відстані. Так при $\gamma=1$ фокусна відстань S_I мм, а при $\gamma=3$ фокусна відстань $f' = 51$ мм, що забезпечує у обох випадках виконання умову нормування першого допоміжного нульового променя $\alpha_{p+1} = \alpha_6 = 1$.

Нижче в таблиці 3.1 наведені результати розрахунків кутів та висот першого допоміжного нульового променя:

Таблиця 3.1 Значення параметрів нульового променя для двох значень збільшення системи

$\gamma=1$				$\gamma=3$			
α_1	0	h_1	17	α_1	0	h_1	51
α_2	0.162	h_2	9.714	α_2	0.485714	h_2	21.8571
α_3	0	h_3	9.714	α_3	0.12143	h_3	17
α_4	-0.162	h_4	17	α_4	-0.161905	h_4	17
α_5	0	h_5	17	α_5	0	h_5	17
α_6	1	h_6		α_6	1	h_6	

Визначивши параметри першого допоміжного нульовогопроменяможна замінити поточні параметри кожного компонента на основні параметри при двох станах системи за формулами:

$$P_i = (\alpha_{i+1} - \alpha_i)^3 P_i^* + 4\alpha_i (\alpha_{i+1} - \alpha_i)^2 W_i^* + \alpha_i (\alpha_{i+1} - \alpha_i) \left[2\alpha_i \left(2 + \frac{1}{n} \right) - \alpha_{i+1} \right] \quad (3.7)$$

$$W_i = (\alpha_{i+1} - \alpha_i)^2 W_i^* + \alpha_i (\alpha_{i+1} - \alpha_i) \left(2 + \frac{1}{n} \right) \quad (3.8)$$

Нижче в таблиці 3.2 наведені результати розрахунків поточних параметрів для кожного компонента та для двох станів оптичної системи.

Таблиця 3.2 Значення поточних параметрівдля кожного компонента та для двох станів оптичної системи

$\gamma=1$	
P_1	$0.00424P_1^*$
P_2	$-0.00424P_2^* + 0.01697W_2^* - 0.019098$
P_3	$-0.00424P_3^*$

P₄	$0.00424P_4^* - 0.01697W_4^* + 0.019098$
P₅	P_5^*
W₁	$0.02621W_1^*$
W₂	$0.02621W_2^* - 0.05897$
W₃	$0.02621W_3^*$
W₄	$0.02621W_4^* - 0.05897$
W₅	W_5^*
$\gamma=3$	
P₁	$0.11458P_1^*$
P₂	$-0.04834P_2^* + 0.25782W_2^* - 0.36524$
P₃	$-0.02274P_3^* + 0.03899W_3^* - 0.02437$
P₄	$0.00424P_4^* - 0.01697W_4^* + 0.01909$
P₅	P_5^*
W₁	$0.23591W_1^*$
W₂	$0.13270W_2^* - 0.39811$
W₃	$0.08027W_3^* - 0.07741$
W₄	$0.02621W_4^* - 0.05897$
W₅	W_5^*

Враховуючи те, що третій і другий компоненти мають однакову оптичну силу, також четвертий і перший компоненти є однаковими за оптичною силою приймемо умову, що вони попарно мають однакові конструктивні параметри, і попарно повернуті один відносно другого на 180 градусів, тоді основні параметри третього компонента можна виразити через основні параметри другого, а основні параметри четвертого компонента – аналогічно виразити через основні параметри першого компонента. Для цього використаємо формули [2]:

$$P_3^* = -P_2^* + 4W_2^* - 4 - 2\pi_2 \quad (3.9)$$

$$P_4^* = -P_1^* + 4W_1^* - 4 - 2\pi_1 \quad (3.10)$$

$$W_3^* = W_2^* - 2 - \pi_2 \quad (3.11)$$

$$W_4^* = W_1^* - 2 - \pi_1 \quad (3.12)$$

Тоді основні параметри третього та четвертого компонента набувають вигляду:

$$P_3^* = P_2^* - 4W_2^* + 4 + 0.5 \quad (3.13)$$

$$P_4^* = P_1^* - 4W_1^* + 4 + 0.5 \quad (3.14)$$

$$W_3^* = -W_2^* + 2 + 0.25 \quad (3.15)$$

$$W_4^* = -W_1^* + 2 + 0.25 \quad (3.16)$$

Підставивши новий вигляд основних параметрів третього та четвертого компонентів, отримуємо новий вигляд поточних компонентів для двох станів.

Вигляд поточних компонентів для першого стану оптичної системи, коли $\gamma=1$:

$$P_1 = 0.00424P_1^* \quad (3.17)$$

$$P_2 = -0.00424P_2^* + 0.01698W_2^* - 0.01909 \quad (3.18)$$

$$P_3 = -0.00424P_2^* + 0.01696W_2^* - 0.01909 \quad (3.19)$$

$$P_4 = 0.00424P_1^* + 0.00001W_1^* - 0.0000045 \quad (3.20)$$

Тоді перша сума Зейделя для першого стану має вигляд:

$$S_I = h_{11}P_1 + h_{12}P_2 + h_{13}P_3 + h_{14}P_4 + h_{15}P_5 =$$

$$= 0.14416P_1^* - 0.08237P_2^* + 0.00017W_1^* + 0.32969W_2^* - 0.30937 \quad (3.21)$$

Вигляд поточних компонентів для другого стану оптичної системи, коли $\gamma=3$:

$$P_1 = 0.11458P_1^* \quad (3.22)$$

$$P_2 = -0.04834P_2^* + 0.25822W_2^* - 0.36524 \quad (3.23)$$

$$P_3 = -0.02274P_2^* + 0.05199W_2^* - 0.03899 \quad (3.24)$$

$$P_4 = 0.04244P_1^* - 3.94430e^{-31} \quad (3.25)$$

Тоді перша сума Зейделя для першого стану має вигляд:

$$S_I = h_{11}P_1 + h_{12}P_2 + h_{13}P_3 + h_{14}P_4 + h_{15}P_5 =$$

$$= 2.47851P_1^* - 1.44327P_2^* + 6.51905W_2^* - 8.64613 \quad (3.26)$$

Записавши суму Зейделя для двох станів оптичної системи маємо у двох рівняннях для S_I чотири невідомих. Але параметри P_i^* , W_i^* мають неявний зв'язок, який в однолінзових компонентах має математичний вираз [2]:

$$P_i^* = P_{0i} + \left[1 - \frac{1}{(n_i + 1)^2} \right] \cdot \left[W_i^* - \frac{1}{2(2 + n_i)} \right]^2, \quad (3.27)$$

де

$$P_{0i} = \frac{(4n_i - 1)n_i}{4(2 + n_i)(n_i - 1)^2}, \quad (3.28)$$

n_i - показник заломлення оптичного матеріалу лінзи.

Використовуючи останні формули, та враховуючи, що матеріалом лінзи буде германій, розрахуємо нові значення поточних параметрів:

1. Для першого стану системи, коли $\gamma=1$.

$$P_1 = 0.0040 \left(W_1^* - \frac{1}{12} \right)^2 + 0.00117 \quad (3.29)$$

$$P_2 = 0.01696 W_2^* - 0.00407 \left(W_2^* - \frac{1}{12} \right)^2 - 0.02027 \quad (3.30)$$

$$P_3 = 0.01696 W_2^* - 0.00407 \left(W_2^* - \frac{1}{12} \right)^2 - 0.02025 \quad (3.31)$$

$$P_4 = 0.00001 W_1^* + 0.00407 \left(W_1^* - \frac{1}{12} \right)^2 + 0.00117 \quad (3.32)$$

2. Для другого стану системи коли $\gamma=3$.

$$P_1 = 0.11000 \left(W_1^* - \frac{1}{12} \right)^2 + 0.03183 \quad (3.33)$$

$$P_2 = 0.25782 W_2^* - 0.04640 \left(W_2^* - \frac{1}{12} \right)^2 - 0.37867 \quad (3.34)$$

$$P_3 = 0.05199 W_2^* - 0.02835 \left(W_2^* - \frac{1}{12} \right)^2 - 0.04531 \quad (3.35)$$

$$P_4 = 0.00407 \left(W_1^* - \frac{1}{12} \right)^2 + 0.00117 \quad (3.36)$$

З урахуванням нових виглядів поточних параметрів отримано таку суму Зейделя для двох станів:

- $\gamma=1$

$$S_I = 0.00017 W_1^* + 0.32969 W_2^* + 0.13839 \left(W_1^* - \frac{1}{12} \right)^2 - 0.0790797312 \left(W_2^* - \frac{1}{12} \right)^2 - 0.35377 \quad (3.37)$$

- $\gamma=3$

$$S_I = 6.51905W_2^* + 2.37937\left(W_1^* - \frac{1}{12}\right)^2 - 1.38554\left(W_2^* - \frac{1}{12}\right)^2 - 8.35857 \quad (3.38)$$

3.3 Розв'язання системи рівнянь та розрахунок радіусів лінз зум-афокальної системи

Записавши першу суму Зейделя для двох станів афокальної системи отримано систему рівнянь з двома невідомими.

$$\begin{cases} S_I = 0.00017W_1^* + 0.32969W_2^* + 0.13839\left(W_1^* - \frac{1}{12}\right)^2 - 0.07907\left(W_2^* - \frac{1}{12}\right)^2 - 0.35377 = 0 \\ S_I = 6.51905W_2^* + 2.37937\left(W_1^* - \frac{1}{12}\right)^2 - 1.38554\left(W_2^* - \frac{1}{12}\right)^2 - 8.35857 = 0 \end{cases} \quad (3.39)$$

Скориставшись програмою Mathcad для розв'язання системи рівнянь отримано корені, які наведені нижче в таблиці 3.3.

Табл.3.3 Значення коренів

W_1^*	W_2^*
$-21.0435 + 5.71e^{-25i}$	$30.1196 - 1.14e^{-27i}$
$21.07661 - 6.13905e^{-25i}$	$29.94457 + 2.60692e^{-27i}$
$0.53091 - 3.25992e^{-23i}$	$2.92347 - 1.35456e^{-25i}$
$-0.36189 + 3.27370e^{-23i}$	$2.91976 + 1.35995e^{-25i}$

Всі чотири пари отриманих коренів містять уявну частину, але вона настільки мізерно мала, що нею можна знехтувати. По дійсній частині прийнятними є третя та четверта пара коренів, тому треба зробити перевірку коренів. Тобто кожну з пар коренів підставити в суму Зейделя для кожного стану. Для більш точної перевірки було використано програму Mathcad, що дало наступні результати:

Перша пара коренів.

1.

$$S_I = 0.00017W_1^* + 0.32969W_2^* + 0.13839\left(W_1^* - \frac{1}{12}\right)^2 - 0.07907\left(W_2^* - \frac{1}{12}\right)^2 - 0.35377 = 0$$

$$S_I = 6.51905W_2^* + 2.37937\left(W_1^* - \frac{1}{12}\right)^2 - 1.38554\left(W_2^* - \frac{1}{12}\right)^2 - 8.35857 = 1.776 \cdot 10^{-15}$$
(3.40)

2. Друга пара коренів.

$$S_I = 0.00017W_1^* + 0.32969W_2^* + 0.13839\left(W_1^* - \frac{1}{12}\right)^2 - 0.07907\left(W_2^* - \frac{1}{12}\right)^2 - 0.35377 = 0$$

$$S_I = 6.51905W_2^* + 2.37937\left(W_1^* - \frac{1}{12}\right)^2 - 1.38554\left(W_2^* - \frac{1}{12}\right)^2 - 8.35857 = 0$$
(3.41)

Перевірка показала, що дві пари коренів дають позитивні результати виправлення сферичної аберації зум-афокальної системи. Це означає, що використовуючи ці корені можна розрахувати радіуси тонких лінз оптичної системи за формулами :

$$\alpha_{2i} = \frac{n}{n+1} - \frac{n-1}{n+1}W_i^* \quad (3.42)$$

$$r_{1i} = \frac{n-1}{n\alpha_{2i}} f' \quad (3.43)$$

$$r_{2i} = \frac{n-1}{n\alpha_{2i}} f' \quad (3.44)$$

Для першої пари коренів радіуси тонких лінз мають значення:

а) радіуси першої лінзи:

$$\alpha_{21} = \frac{n}{n+1} - \frac{n-1}{n+1}W_1^* = 0.481 \quad (3.45)$$

$$r_{11} = \frac{n-1}{n\alpha_{21}} f' = 63.568 \text{ MM} \quad (3.46)$$

$$r_{12} = \frac{n-1}{n\alpha_{21}} f' = 340.243 \text{ MM} \quad (3.47)$$

b) радіуси другої тонкої лінзи:

$$\alpha_{22} = \frac{n}{n+1} - \frac{n-1}{n+1} W_2^* = -0.954 \quad (3.48)$$

$$r_{12} = \frac{n-1}{n\alpha_{22}} f' = 47.166 \text{ MM} \quad (3.49)$$

$$r_{22} = \frac{n-1}{n\alpha_{22}} f' = 37.373 \text{ MM} \quad (3.50)$$

Для другої пари коренів радіуси лінз мають значення:

a) радіуси першої тонкої лінзи:

$$\alpha_{21} = \frac{n}{n+1} - \frac{n-1}{n+1} W_1^* = 1.017 \quad (3.51)$$

$$r_{11} = \frac{n-1}{n\alpha_{21}} f' = 77.423 \quad (3.52)$$

$$r_{12} = \frac{n-1}{n\alpha_{21}} f' = 102.654 \quad (3.53)$$

b) радіуси другої тонкої лінзи:

$$\alpha_{22} = \frac{n}{n+1} - \frac{n-1}{n+1} W_2^* = -0.952 \quad (3.54)$$

$$r_{12} = \frac{n-1}{n\alpha_{22}} f' = 47.276 \quad (3.55)$$

$$r_{22} = \frac{n-1}{n\alpha_{22}} f' = 37.442 \quad (3.56)$$

3.4 Перевірка результатів параметричного синтезу за допомогою програми ZEMAX

За результатами параметричного синтезу було отримано два варіанта конструкції тонких лінз. Кожен з варіантів дав більш-менш позитивний результат виправлення сферичної аберації. Але для того, щоб обрати один із цих варіантів потрібно зробити перевірку якості зображень, що формує афокальна система, з використанням програми ZEMAX, та проаналізувати рівень польових аберацій, які поки що не коригувалися в оптичній системі афокальної насадки.

Критерієм якості зображень точки на осі та на краю поля зору обираємо RMS-радіус спот-діаграм, так як система не є наближеною до дифракційної обмеженості.

Дані конструктивних параметрів та спот-діаграма для першого варіанту оптичної системи в програмі ZEMAX :

а) для $\gamma=1$

New	Open	Save	Sas	Upd	Gen	File	Wav	Lay	L3d	Ray	Opd	Fcd	Spt	Mtf	Fps	Enc	Opt	Ham	Tol	Gla	Len	Sys	Pre
Lens Data Editor																							
Edit Solves Options Help																							
Surf>Type		Comment	Radius	Thickness	Glass		Semi-Diameter		Conic														
OBJ	Standard		Infinity	Infinity			Infinity		0.000000														
1	Standard		163.568000	0.000000	4.01,0.0		37.614232		0.000000														
2	Standard		340.243000	45.000000			38.095332		0.000000														
3	Standard		47.166000	0.000000	4.00,0.0		12.614596		0.000000														
4	Standard		37.373000	10.000000			12.468604		0.000000														
5	Standard		-37.373000	0.000000	4.00,0.0		10.436904		0.000000														
6	Standard		-47.166000	45.000000			10.481232		0.000000														
7	Standard		-340.243000	0.000000	4.00,0.0		11.663085		0.000000														
8	Standard		-163.568000	0.000000			11.643468		0.000000														
STO	Paraxial			17.000000			10.000000		U														
IMA	Standard		Infinity	-			2.736218		0.000000														

Рис.3.3 Конструктивні параметри для першого кореня та для $\gamma=1$

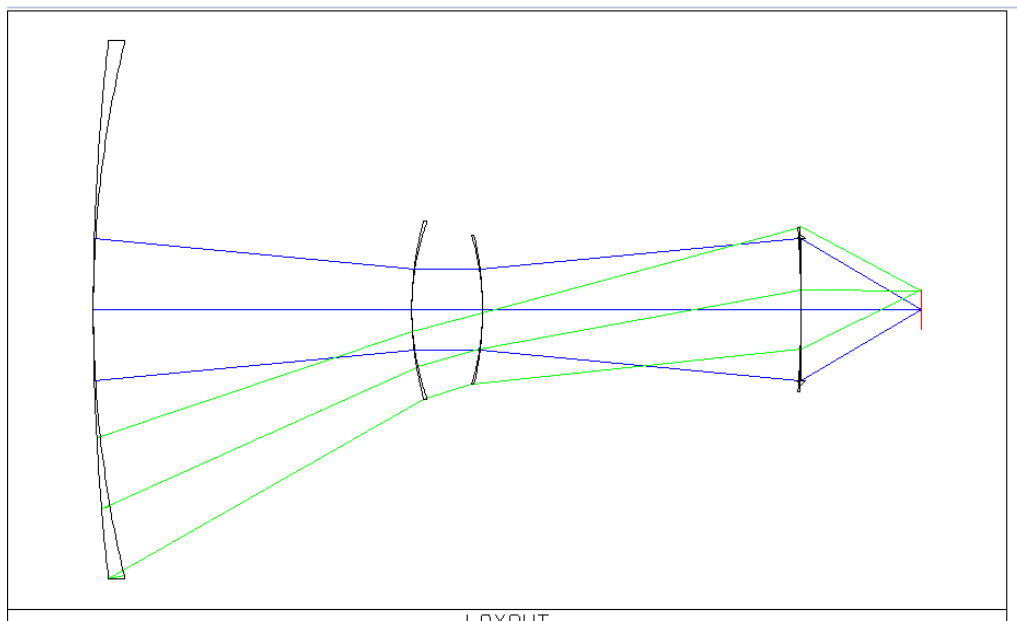


Рис.3.4 Оптична схема для першого кореня і для $\gamma=1$

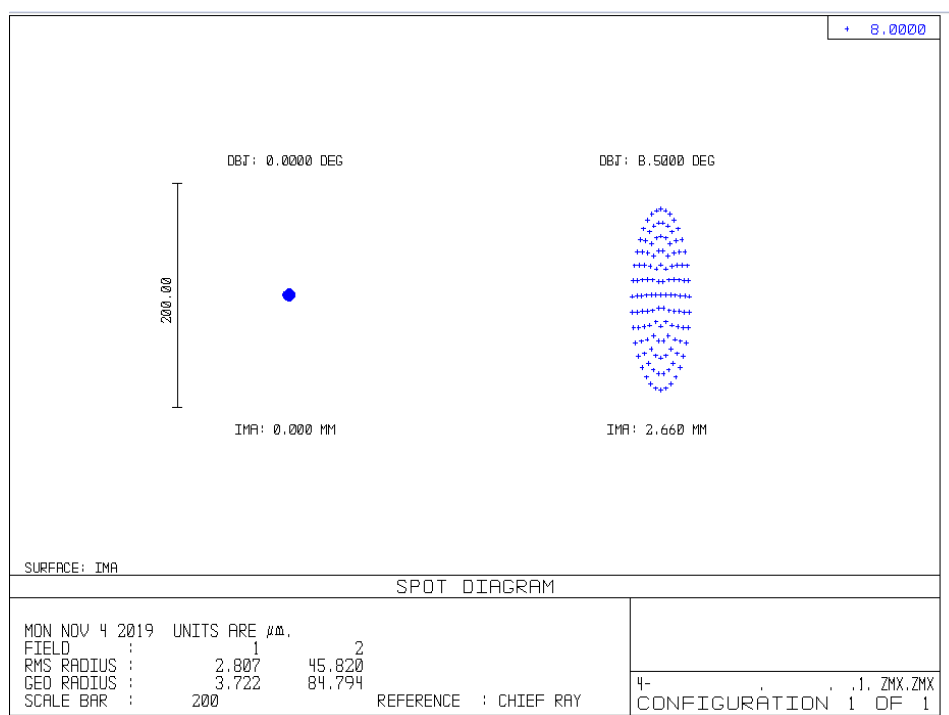


Рис.3.5 Значення спот-діаграми для першого кореня і для $\gamma=1$

b) для $\gamma=3$

Lens Data Editor						
Edit Solves Options Help						
	Surf:Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity
1	Standard		163.568000	0.000000	4.01,0.0	50.606906
2	Standard		340.243000	60.000000		51.645068
3	Standard		47.166000	0.000000	4.00,0.0	15.696248
4	Standard		37.373000	40.000000		15.429866
5	Standard		-37.373000	0.000000	4.00,0.0	9.899717
6	Standard		-47.166000	0.000000		9.960540
7	Standard		-340.243000	0.000000	4.00,0.0	10.187295
8	Standard		-163.568000	0.000000		10.173630
STO	Paraxial			17.000000		10.000000
IMA	Standard		Infinity	-		4.331830

Рис.3.3 Конструктивні параметри для першого кореня та для $\gamma=3$

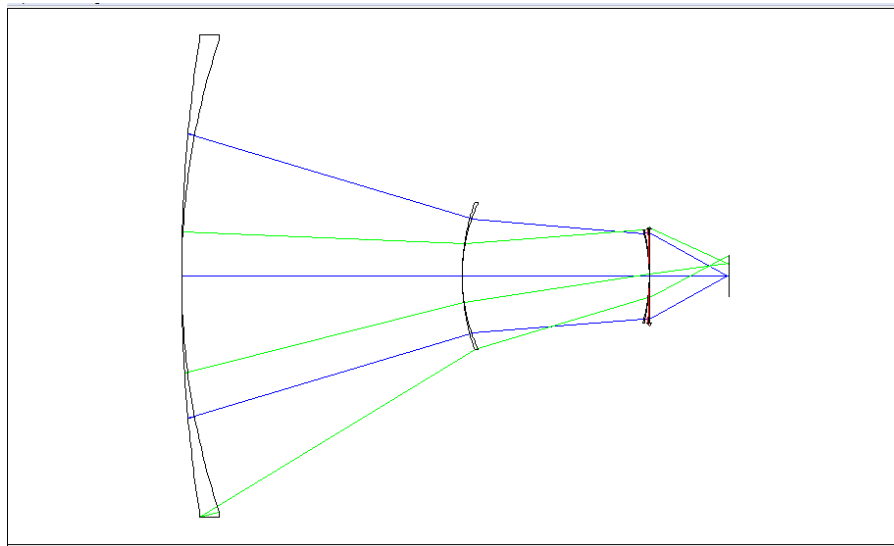


Рис.3.6 Оптична схема для першого кореня і для $\gamma=3$

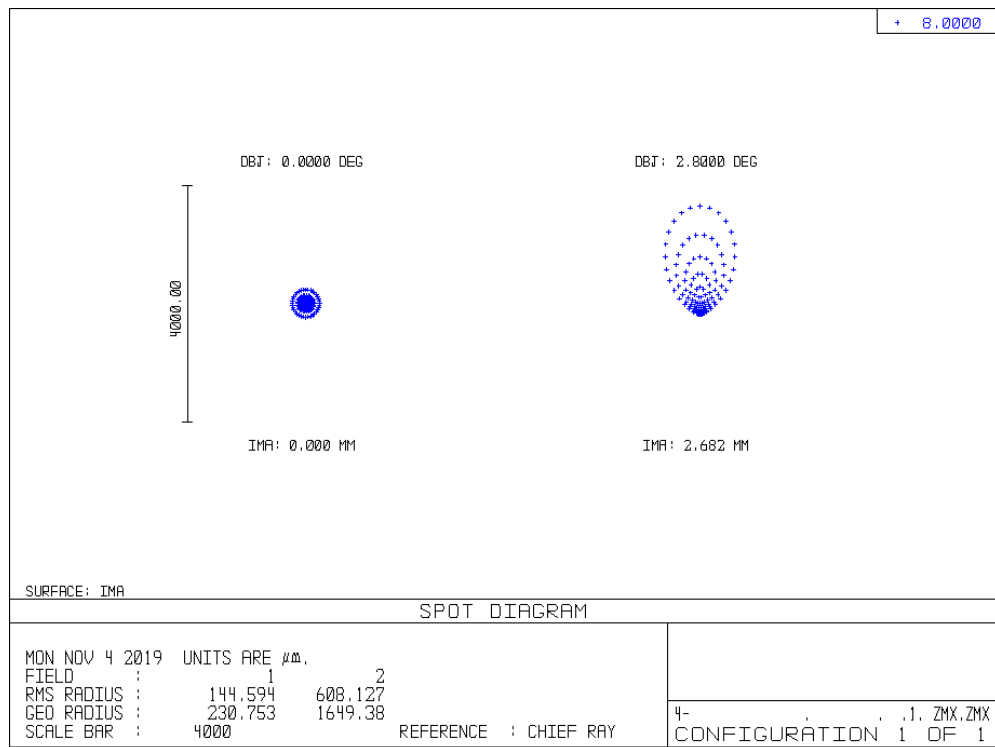


Рис.3.7 Значення спот-діаграми для першого кореня і для $\gamma=3$

Дані конструктивних параметрів та спот-діаграма для другого варіанту оптичної системи в програмі ZEMAX :

а) для $\gamma=1$

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity
1	Standard		77.423000	0.000000	4.01, 0.0	36.872922
2	Standard		102.654000	45.000000		37.801922
3	Standard		47.276000	0.000000	4.00, 0.0	15.076926
4	Standard		37.442000	10.000000		14.843326
5	Standard		-37.442000	0.000000	4.00, 0.0	13.671848
6	Standard		-47.276000	45.000000		13.792589
7	Standard		-102.654000	0.000000	4.00, 0.0	14.077105
8	Standard		-77.423000	0.000000		14.044011
STO	Paraxial			17.000000		10.000000 U
IMA	Standard		Infinity	-		2.508455

Рис.3.8 Конструктивні параметри для другого кореня та для $\gamma=1$

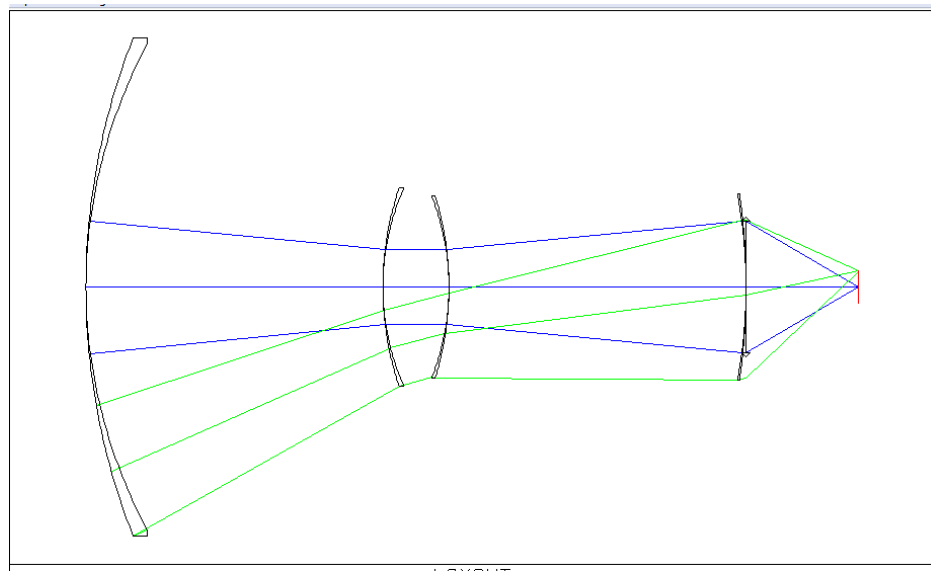


Рис.3.9 Оптична схема для другого кореня і для $\gamma=1$

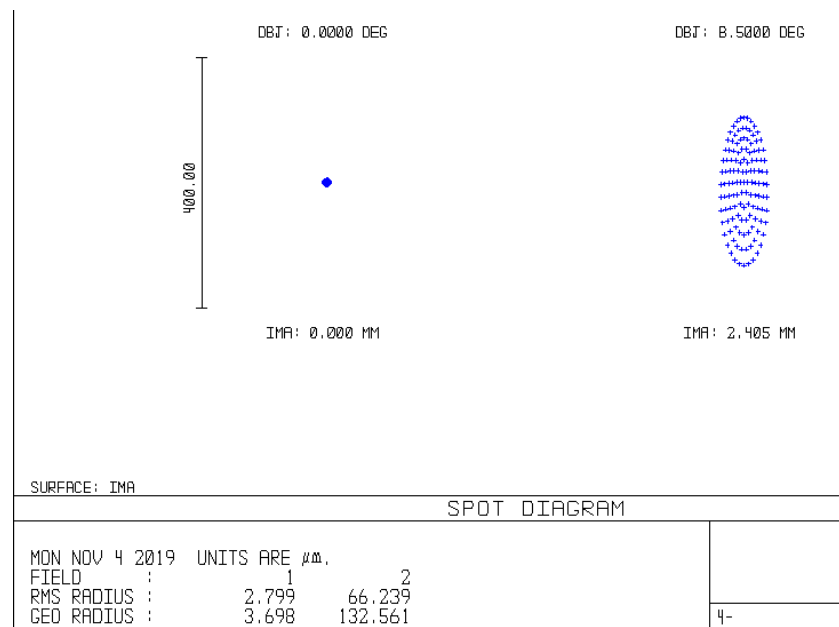


Рис.3.10 Значення спот-діаграми для другого кореня і для $\gamma=1$

б) для $\gamma=3$

	Surf>Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity
1	Standard		77.423000	0.000000	4.01,0.0	50.100099
2	Standard		102.654000	60.000000		52.522610
3	Standard		47.276000	0.000000	4.00,0.0	19.083442
4	Standard		37.442000	40.000000		18.620191
5	Standard		-37.442000	0.000000	4.00,0.0	9.836743
6	Standard		-47.276000	0.000000		9.896238
7	Standard		-102.654000	0.000000	4.00,0.0	10.033202
8	Standard		-77.423000	0.000000		10.011874
STO	Paraxial			17.000000		10.000000
IMA	Standard		Infinity	-		3.357866

Рис.3.11 Конструктивні параметри для другого кореня та для $\gamma=3$

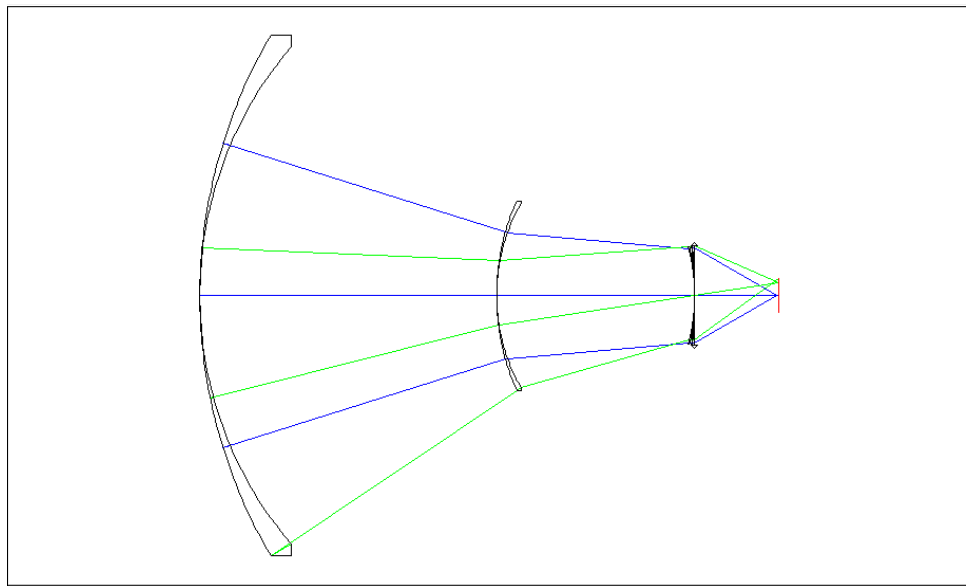


Рис.3.12 Оптична схема для другого кореня і для $\gamma=3$

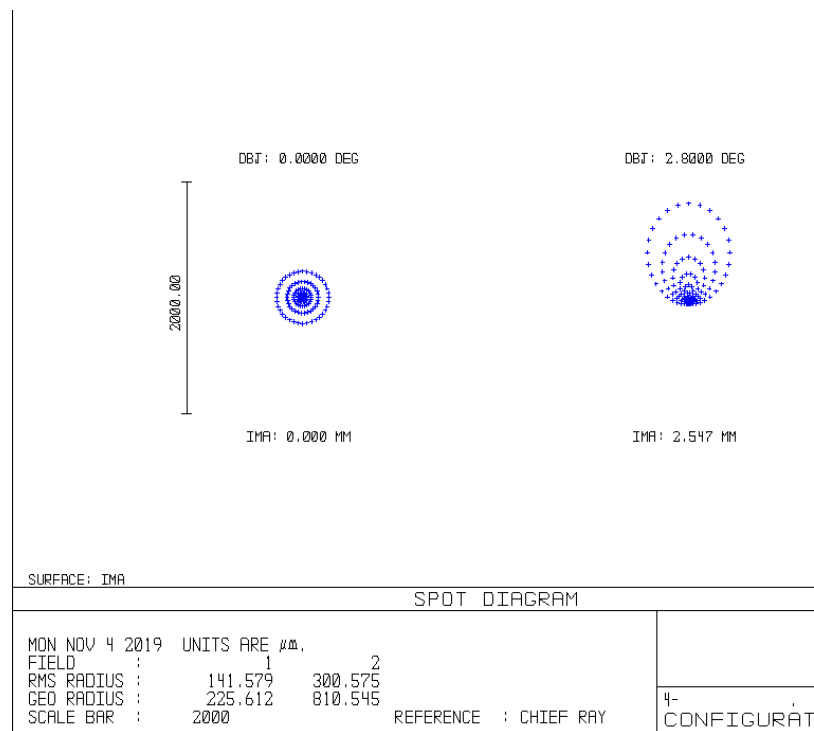


Рис.3.13 Значення спот-діаграми для другого кореня і для $\gamma=3$

Наведеним вище підтверджено, що обидва варіанта афокальної системи дають задовільне виправлення сферичної аберації. Це означає, що рівняння для виправлення сферичної аберації були записані та розв'язані коректно. Щодо стану інших аберацій в системі, а саме коми та астигматизму, вони присутні в двох варіантах системи та двох її станах. Але проаналізувавши спот-діаграми можна зробити висновок, що розміри абераційних плям від коми та астигматизму в другому варіанту системи є меншими. Тому для подальшої оптимізації будемо використовувати другий варіант оптичної афокальної системи, але перед цим потрібно сконструювати лінзи компонентів згідно вимог ОСТ 3-490.

3.5 Конструювання лінз та компоновка афокальної системи

Згідно вимог ОСТ 3-490 товщини лінз на осі повинні мати матимуть такі значення: для першого та четвертого компонента $d=3$ мм, для другого та третього компонента $d=2.5$ мм.

З урахуванням товщини лінз на осі потрібно розрахувати відстані між компонентами для цього спочатку потрібно розрахувати основні параметри кожної лінзи за формулами:

$$f' = \frac{1}{(n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + \frac{(n-1)^2 d}{nr_1 r_2}} \quad (3.57)$$

$$S'_{f'} = f' \left(1 - \frac{n-1}{nr_1} d\right) \quad (3.58)$$

$$S_f = -f' \left(1 + \frac{n-1}{nr_2} d\right) \quad (3.59)$$

$$S'_{H'} = -f' \frac{n-1}{nr_1} d \quad (3.60)$$

$$S_H = -f' \frac{n-1}{nr_2} d \quad (3.61)$$

В табл.3.4 наведені значення параксіальних оптичних характеристик кожної лінзи.

Таблиця 3.4 Значення параксіальних оптичних характеристик лінз

Оптичні характеристики	Перший компонент	Другий компонент	Третій компонент	Четвертий компонент
f' , мм				
$S'_{f'}$, мм	101.951	-57.643	-63.153	107.379
S_f , мм	-107.379	63.153	57.643	101.951
$S'_{H'}$, мм	-3.052	2.381	-3.13	3.052
S_H , мм	-2.37	3.13	-2.381	2.37

Для того, щоб афокальна система зберігала свої властивості потрібно, щоб між задньою головною площиною попередньої лінзи та передньою головною площиною наступної лінзи були відстані, які отримані і показані в розділі 2 при дослідженнях чотирьохкомпонентної афокальної системи, див. рис. 2. 11.

Для першого стану системи тобто, коли $\gamma=1$, відстані між лінзами повинні мати значення:

$$\begin{aligned}d_2 = d_6 = d'_1 - S'_{1H'} - S_{2H} &= 45 - 3.13 - 3.052 = 38.818 \text{ мм} \\d_4 = d'_2 + S'_{2H'} + S_{3H} &= 10 + 2.381 + 2.381 = 14.762 \text{ мм}\end{aligned}\quad (3.62)$$

Для другого стану системи тобто, коли $\gamma=3$, відстані між лінзами повинні мати значення:

$$\begin{aligned}d_2 = d'_1 - S'_{1H'} - S_{2H} &= 60 - 3.13 - 3.052 = 53.818 \text{ мм} \\d_4 = d'_2 + S'_{2H'} + S_{3H} &= 40 + 2.381 + 2.381 = 44.762 \text{ мм}\end{aligned}\quad (3.63)$$

Визначивши відстані між лінзами та товщини лінз можна оптимізувати оптичну систему в програмі ZEMAX.

3.6 Оптимізація афокальної оптичної системи в програмі ZEMAX

Метою оптимізації конструктивних параметрів зум-афокальної системи є досягнення таких їх значень, при яких вимоги до RMS-радіусів абераційних плям, та значення МПФ на просторових частотах, вказаних у вихідних даних, досягають потрібних значень.

Спот-діаграмивихідного стану системи до оптимізації, показанана рис. 3.14-3.15, свідчить про те, що зум-афокальна система ще не забезпечує потрібної якості зображень точок на осі та на краю поля зору.

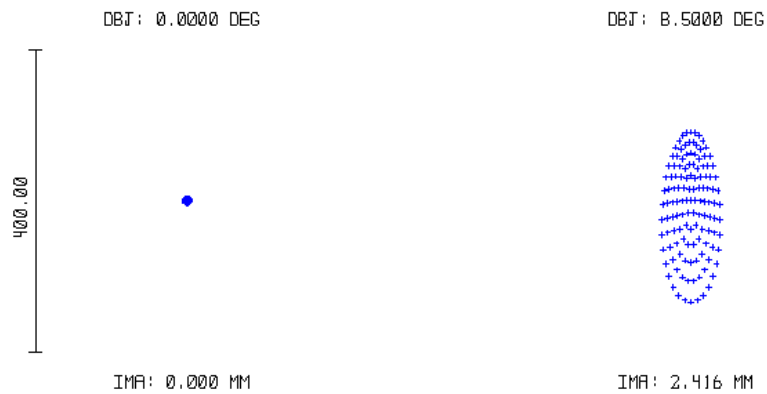


Рис. 3.14 Спот-діаграма зум-афокальної оптичної системи до оптимізації для $\gamma=1$

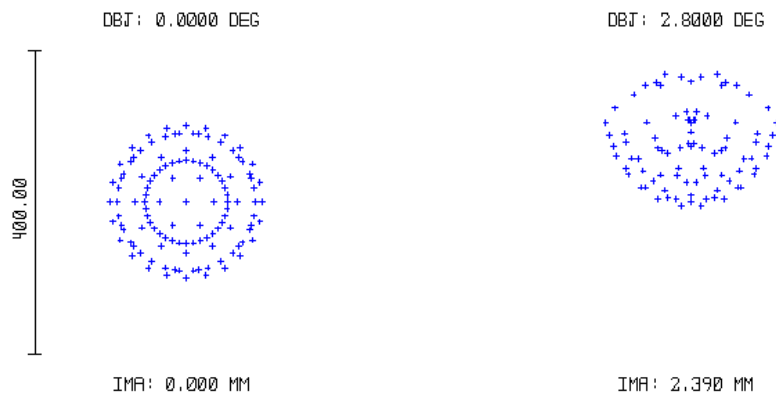


Рис. 3.15 Спот-діаграма зум-афокальної оптичної системи до оптимізації для $\gamma=3$

Першим кроком оптимізації було виявлення за допомогою програми ZEMAX, тих поверхонь системи, корекція параметрів яких, особливо асферизація яких, забезпечує найкращий результат. Визначаючи радіуси оптичних поверхонь та коефіцієнти асферики другого порядку як варіабельні, вдалося процедурою оптимізації, здійсненою в ZEMAX, суттєво покращити якість зображення по всьому полю і для вказаних станів системи. Перевірка якості зображення при $\gamma=2$ також показала достатньо високу якість зображень у площині фотоприймача тепловізійної камери.

На рис.3.16-3.24 спот-діаграми, графіками функції концентрації енергії, та графіками МПФ підтверджено факт виконання вимог технічного завдання щодо габаритних, параксіальних параметрів та параметрів і характеристик якості зображень, утворених оптичнозум-афокальною системою у заданому діапазоні кутового збільшення.

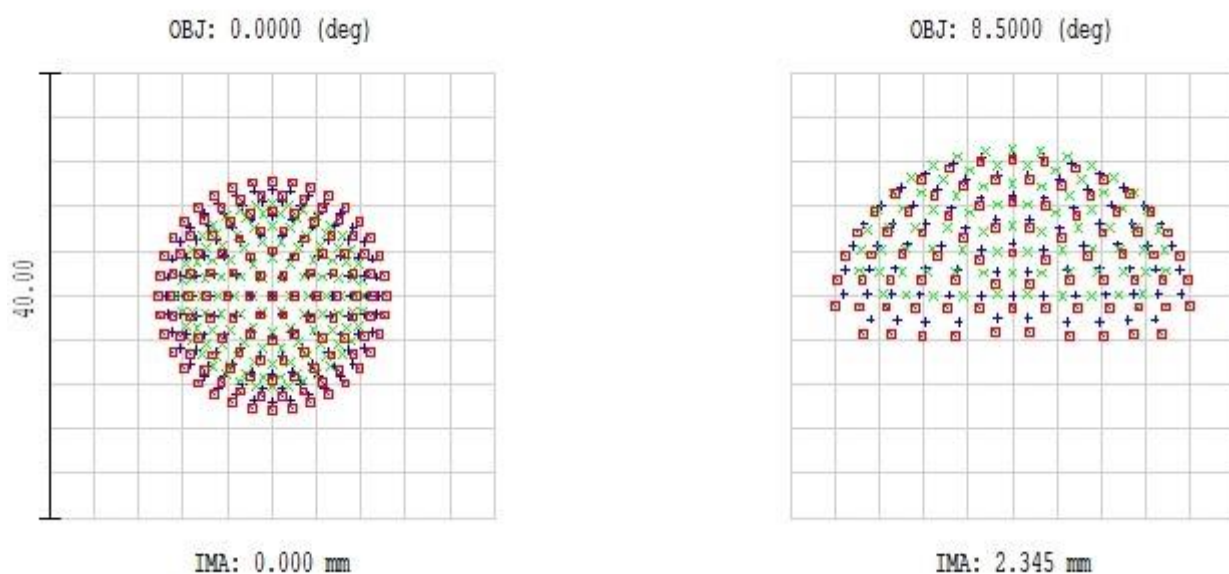


Рис.3.16 Спот-діаграма зум-афокальної оптичної системи після оптимізації для $\gamma=1$

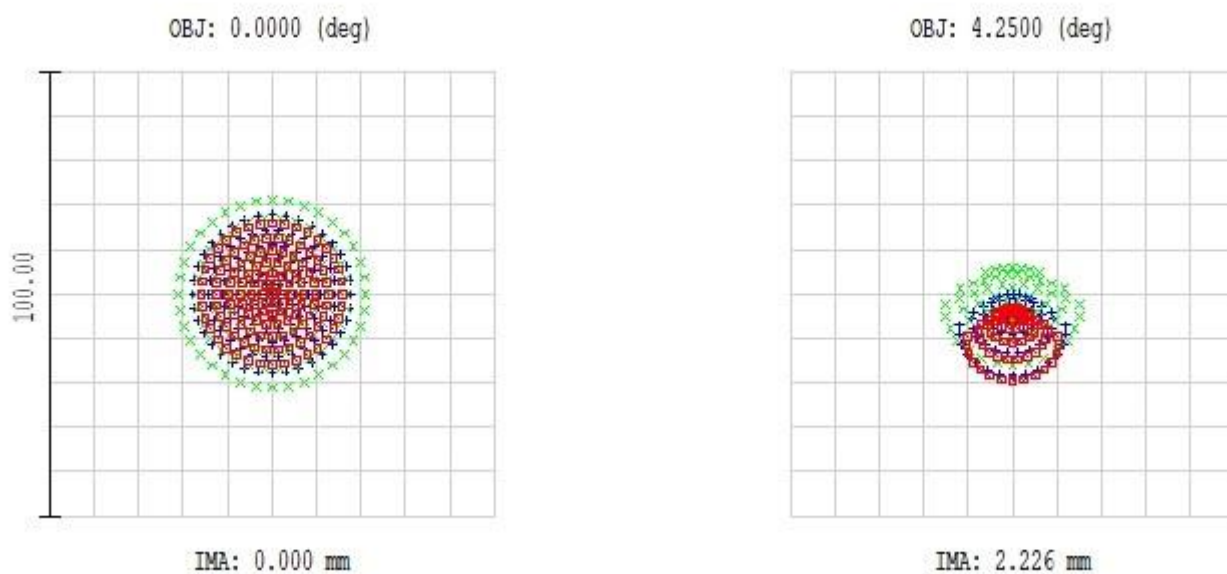


Рис.3.17 Спот-діаграма зум-афокальної оптичної системи після оптимізації для $\gamma=2$

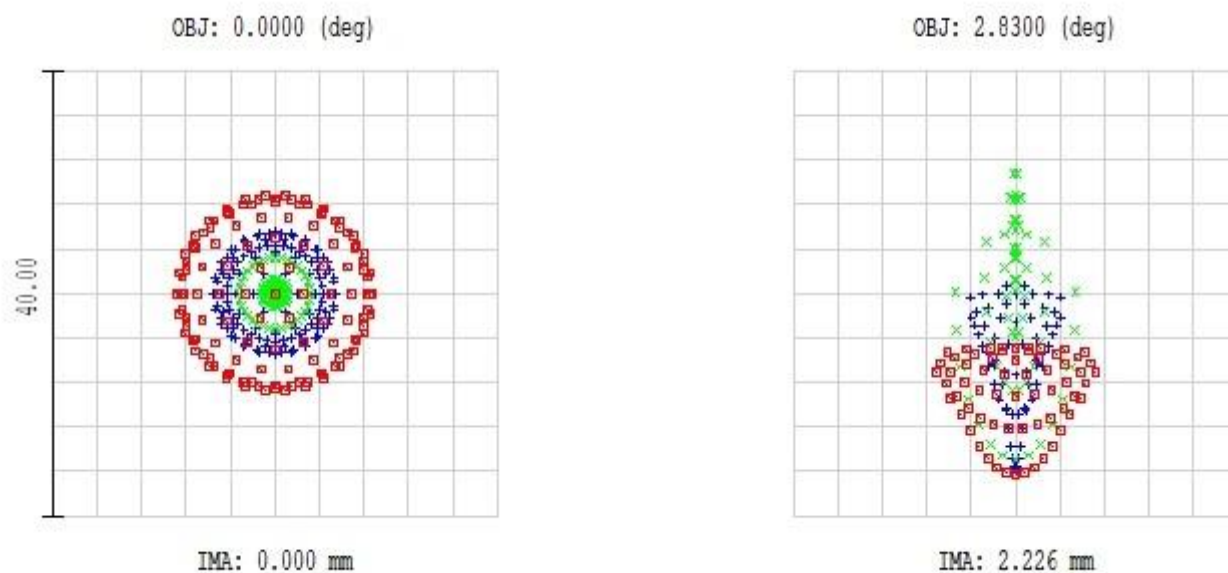


Рис.3.18 Спот-діаграма зум-афокальної оптичної системи після оптимізації для $\gamma=3$

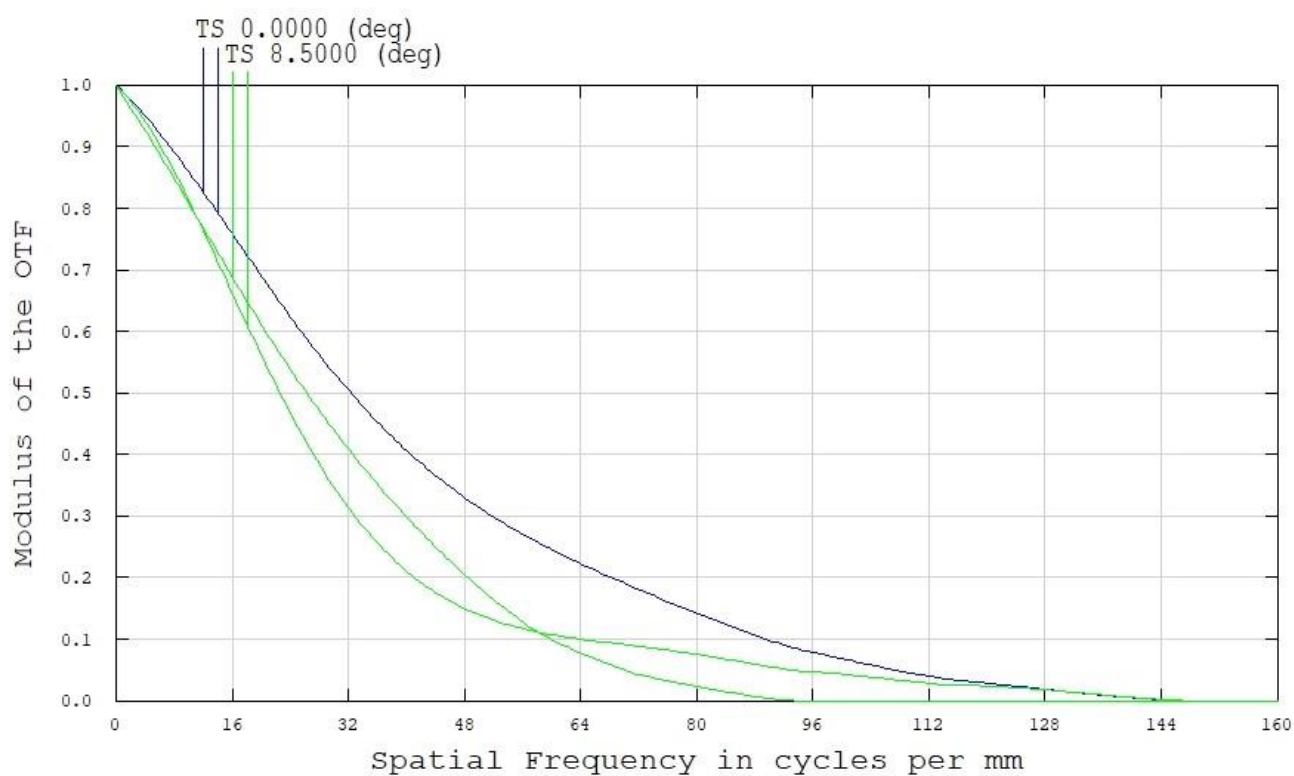


Рис.3.19 Графік МПФ зум-афокальної оптичної системи після оптимізації для $\gamma=1$

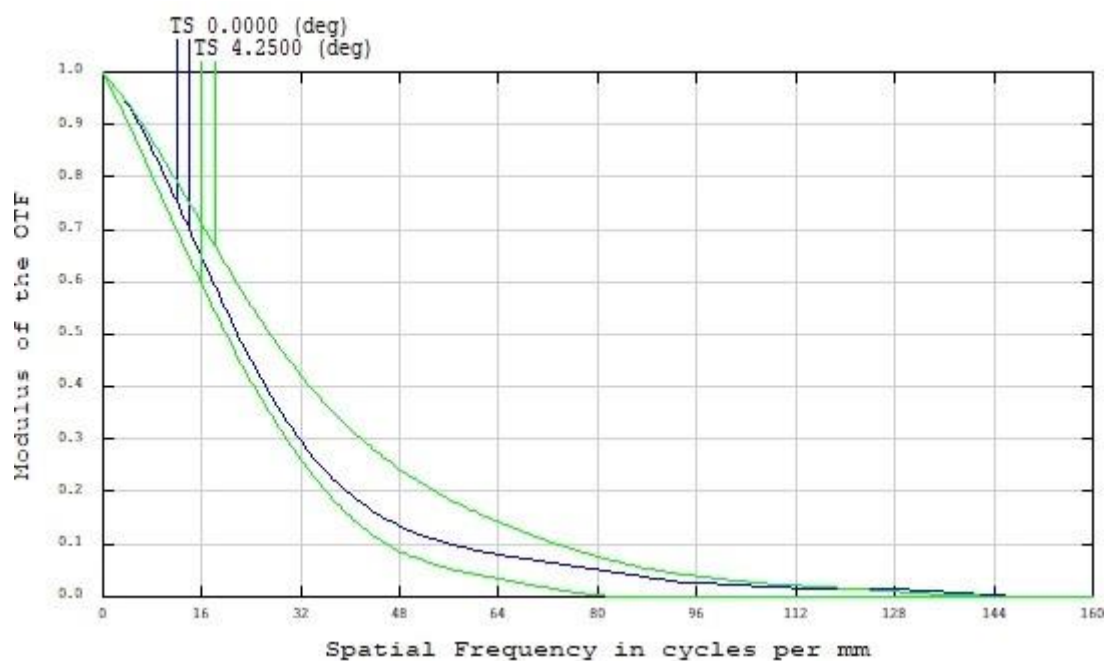


Рис.3.20 Графік МПФ зум-афокальної оптичної системи після оптимізації для $\gamma=2$

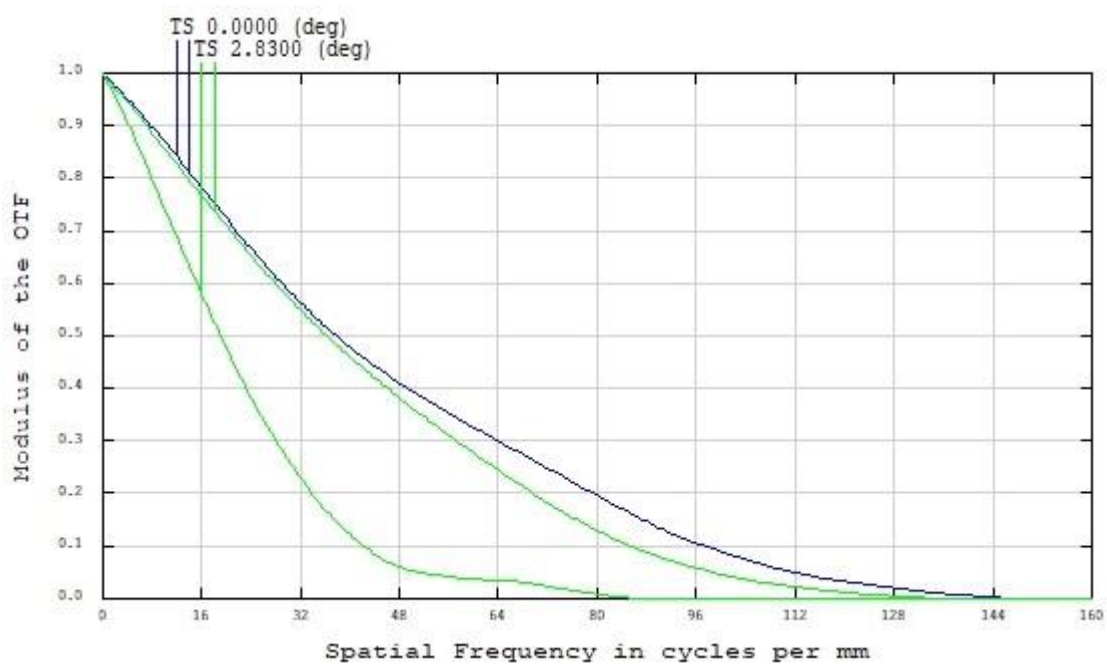


Рис.3.21 Графік МПФ зум-афокальної оптичної системи після оптимізації для $\gamma=3$

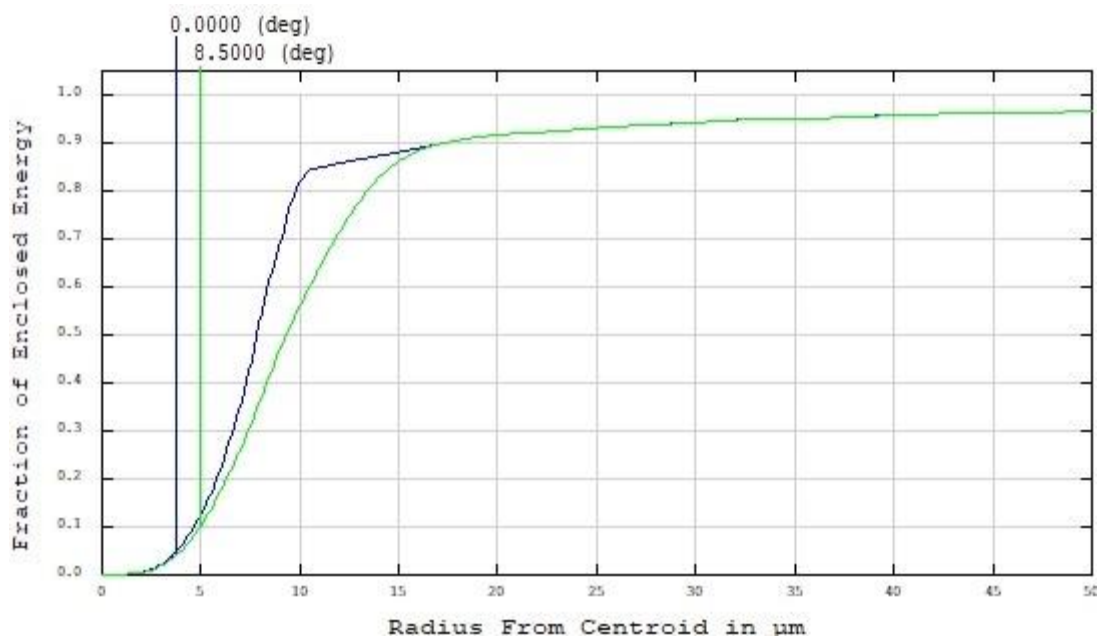


Рис.3.22 Графік функції концентрації енергії зум-афокальної оптичної системи після оптимізації для $\gamma=1$

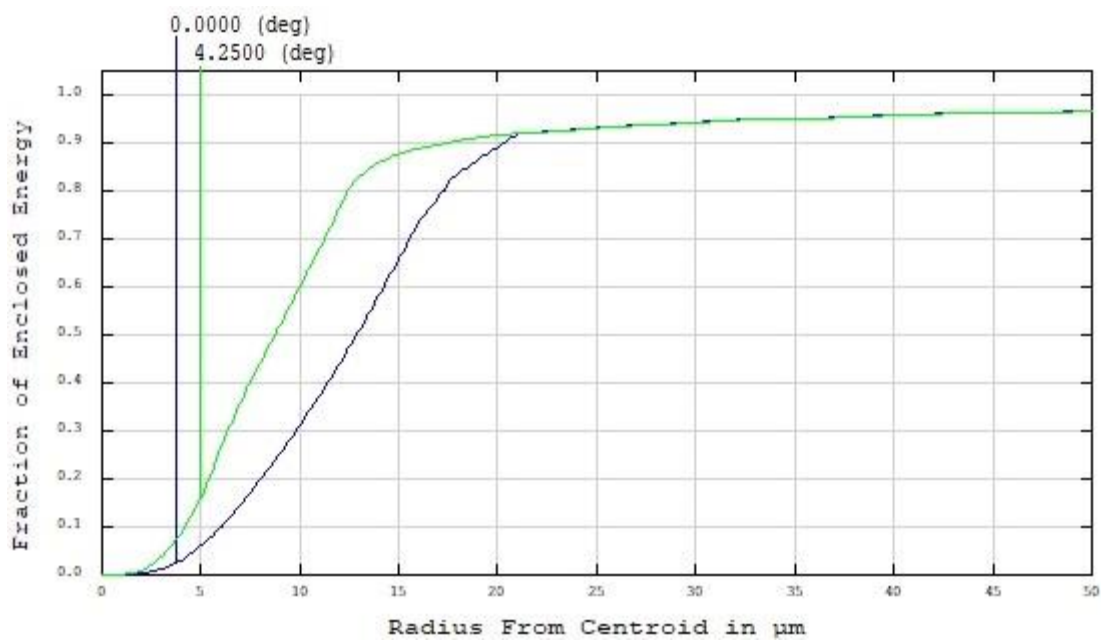


Рис.3.23 Графік функції концентрації енергії зум-афокальної оптичної системи після оптимізації для $\gamma=2$

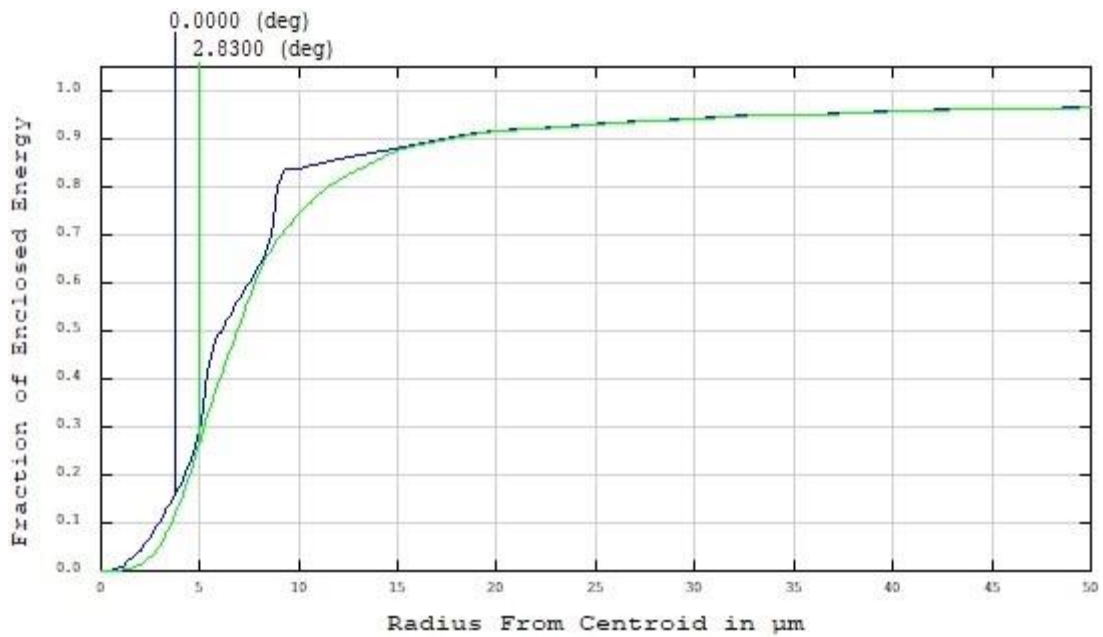


Рис.3.24 Графік функції концентрації енергії зум-афокальної оптичної системи після оптимізації для $\gamma=3$

Нижче наведені конструктивні параметри оптимізованої оптичної систем в трьох її станах, які використані при виготовленні оптичної схеми та робочих креслеників оптичних деталей зум-афокальної системи.

Табл. 3.5 Значення конструктивних параметрів зум-афокальної оптичної системи

$\gamma=1^x$					
r,мм		d,мм	n,мм	Ø,мм	k
r ₁	136.183	3	Германій	60	-
r ₂	239.109	38.818			0.532
r ₃	147.793	2.5	Германій	40	-
r ₄	80.201	14.762			-
r ₅	-80.201	2.5	Германій	30	-
r ₆	-147.793	38.818			-0.532
r ₇	-239.109	3	Германій	35	-
r ₈	-136.183				-

Продовження табл.3.5

$\gamma=2^{\times}$					
r,мм		d,мм	n,мм	Ø,мм	k
r ₁	136.183	3	Германій	60	-
r ₂	239.109	51.107			0.532
r ₃	147.793	2.5	Германій	40	-
r ₄	80.201	28.501			-
r ₅	-80.201	2.5	Германій	30	-
r ₆	-147.793	18.847			-0.532
r ₇	-239.109	3	Германій	35	-
r ₈	-136.183				-
$\gamma=3^{\times}$					
r,мм		d,мм	n,мм	Ø,мм	k
r ₁	136.183	3	Германій	60	-
r ₂	239.109	53.818			0.532
r ₃	147.793	2.5	Германій	40	-
r ₄	80.201	44.762			-
r ₅	-80.201	2.5	Германій	30	-
r ₆	-147.793	0			-0.532
r ₇	-239.109	3	Германій	35	-
r ₈	-136.183				-

3.7 Відтворення функції напрямних прорізів в циліндрі механізму

Розроблена зум-афокальна оптична система мати механізм одночасного пересування лінзових компонентів із збереженням таких відстаней між ними, при яких вона залишається телескопічною із потрібним кутовим збільшенням.

Для цього в панкратичних системах застосовують механізм, що складається із двох циліндрів. На рис. 3.25 показано принципову конструкцію такого механізму, розробленого для чотирьохкомпонентної зум-афокальної системи.

Всередині внутрішнього циліндру, поз.5, знаходяться лінзи 2 та 3 в своїх оправах. В цих оправах вставлені металеві штирі-пальці, поз. 7, які входять у прямий проріз внутрішнього циліндру і фігурний проріз зовнішнього циліндру, поз.6. Прямий проріз внутрішнього циліндру є паралельним осі цього циліндру, він забезпечує переміщення лінз 2 і 3 вздовж цього циліндру без обертань.

Фігурний проріз у зовнішньому циліндрі при обертанні цього циліндру навколо внутрішнього циліндру зсуває оправи лінз 2 і 3 разом із лінзами. Деталь поз.8 знаходиться у різьбовому з'єднанні з циліндром поз.5 і виключає поздовжній зсув зовнішнього циліндра відносно внутрішнього.

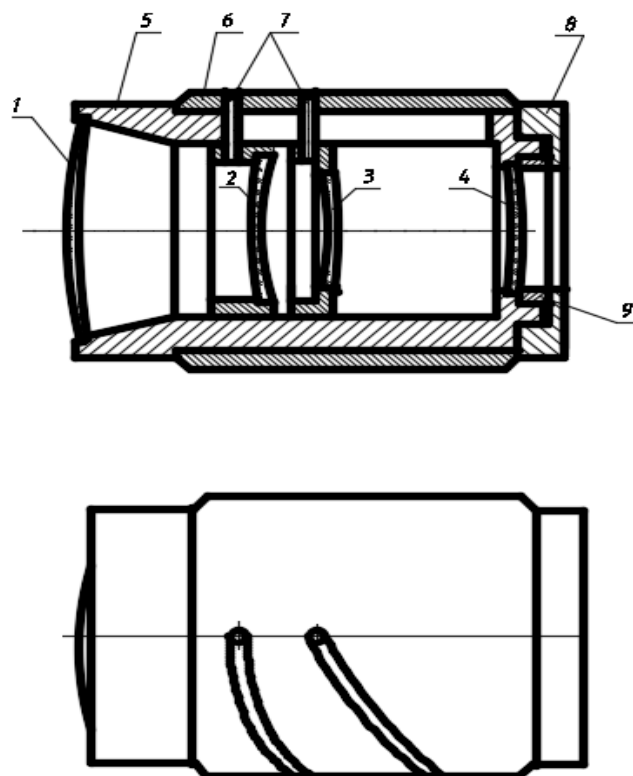


Рис. 3. 25 Конструкція механізму зсуву другого та третього лінзового компонентів чотирьохкомпонентної зум-афокальної насадки

Фігурний проріз виготовляється фрезеруванням на станку з програмним числовим управлінням, тому потрібно мати функції, які встановлюють зв'язок між кутом φ обертання циліндра навколо своєї осі при фрезеруванні і величиною поздовжнього зсуву $d(\varphi)$ циліндру відносно фрези.

Встановлення функцій $d_1(\varphi)$ та $d_2(\varphi)$, через які можна виготовити відповідні прорізи для зсуву лінзи 2 та лінзи 3 відповідно, є задачею даного підрозділу.

Нехай повний діапазон зсуву лінз 2 і 3 здійснюється при обертанні циліндра 6 навколо осі на кут 90° . Задаємо цей діапазон дискретними значеннями кута φ з кроком 10° . Цим значенням φ поставимо у відповідність значення зсуву лінз (або фрези) $d_1(\varphi)$ та $d_2(\varphi)$, як це показано нижче:

$$\varphi = \begin{Bmatrix} 0^\circ \\ 10^\circ \\ 20^\circ \\ 30^\circ \\ 40^\circ \\ 50^\circ \\ 60^\circ \\ 70^\circ \\ 80^\circ \\ 90^\circ \\ 100^\circ \end{Bmatrix} \quad d_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 4.583 \\ 7.728 \\ 9.924 \\ 11.494 \\ 12.621 \\ 13.438 \\ 14.033 \\ 14.466 \\ 14.778 \\ 15.0 \end{Bmatrix} \quad d_2 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0.917 \\ 3.091 \\ 5.958 \\ 9.196 \\ 12.621 \\ 16.126 \\ 19.646 \\ 23.145 \\ 26.601 \\ 30 \end{Bmatrix} \quad (3.64)$$

Функції $d_1(\varphi)$ та $d_2(\varphi)$ можна відтворити апроксимацією значень d_1 та d_2 методом регресії степеневим поліномом. Для цього можна скористатися програмою Mathcad:

$k = 4$ (бажана чи потрібна кількість членів степеневого поліному)

$$s = \text{regress}(\varphi, d_1(\varphi), k) \quad (3.65)$$

$$A(t) = \text{interp}(s, \varphi, d_1(\varphi), t) \quad (3.66)$$

Для функції $d_1(\varphi)$ коефіцієнти при степенях φ мають значення:

$$s = \begin{Bmatrix} 0.52659 \\ -8.36597 \cdot 10^{-3} \\ 6.8789 \cdot 10^{-5} \\ -2.2838 \cdot 10^{-7} \end{Bmatrix}, \quad (3.67)$$

А сама функція має вигляд:

$$d(\varphi) = 0.52659\varphi - 8.36597 \cdot 10^{-3} \varphi^2 + 6.8789 \cdot 10^{-5} \varphi^3 - 2.2838 \cdot 10^{-7} \varphi^4. \quad (3.68)$$

Для функції $d_2(\varphi)$ коефіцієнти при степенях φ мають значення

$$s = \begin{Bmatrix} 0.0373 \\ 7.30382 \cdot 10^{-3} \\ -7.25944 \cdot 10^{-5} \\ 2.58916 \cdot 10^{-7} \end{Bmatrix} \quad (3.69)$$

А сама функція:

$$d(\varphi) = 0.0373\varphi + 7.30382 \cdot 10^{-3} \varphi^2 - 7.25944 \cdot 10^{-5} \varphi^3 + 2.58916 \cdot 10^{-7} \varphi^4 \quad (3.70)$$

Графік апроксимації функції зсуву та графік даних зображено на рисунках рис.3.26 та рис. 3.27.

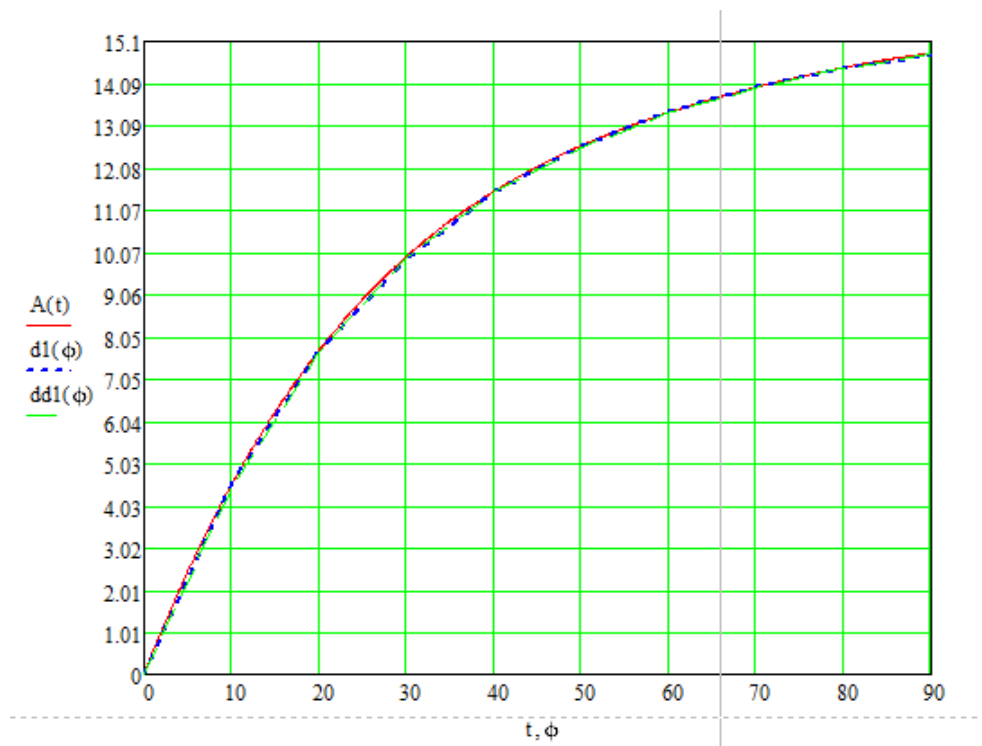


Рис.3. 26 Графік апроксимації функції зсуву та графік даних для першої відстані

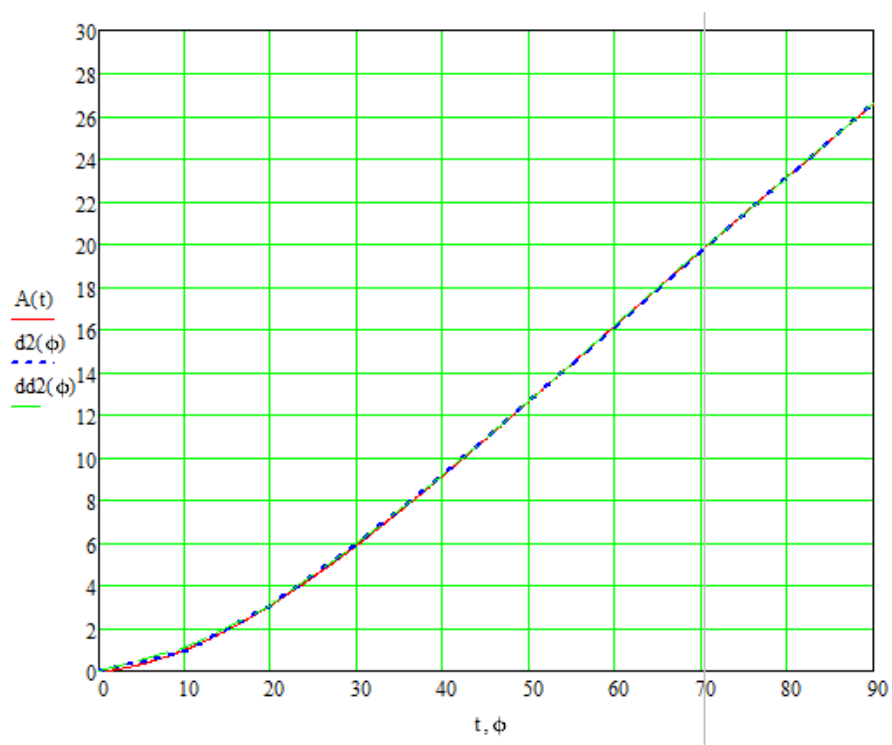


Рис. 3.27 Графік апроксимації функції зсуву та графік даних для першої відстані

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ЗУМ-АФОКАЛЬНА ЧОТИРЬОХКОМПОНЕНТНА НАСАДКА ДЛЯ ОБ'ЄКТИВІВ ТЕПЛОВІЗОРА»

4.1 Опис ідеї проекту

Розглянувши застосування тепловізорів в воєнній галузі, було виявлено, що є потреба у їх модернізації. Модернізація полягає у наданні оптичній системі тепловізора з об'єктивом, який має фіксоване значення фокусної відстані, властивості трансфокатора. Реалізація системи трансфокатора передбачає встановлення перед штатним об'єктивом тепловізора афокальної насадки. Якщо афокальна насадка має можливість змінювати кутове збільшення, тобто є зум-афокальною системою, то разом з нею стаціонарний об'єктив перетворюється у трансфокатор. У зв'язку з цим було запропоновано створити лінзову зум-афокальну насадку, яка не потребує механізму введення або видалення стаціонарної афокальної насадки перед штатним об'єктивом. Зум-афокальна насадка забезпечує тепловізор декількома значеннями фокусної відстані його оптичної системи та дає змогу спостерігати з різними збільшеннями одній і тій же об'єкти.

У даному розділі проведено аналіз стартап проекту на тему " Зум-афокальна насадка для тепловізора".

Ідея проекту полягає в аналізі створеної моделі, її застосуванні та вигоди для користувача.

У таблиці 4.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап проекту

Змісті деї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення зум-афокальної насадки для спостереження об'єктів за допомогою тепловізора з різними збільшеннями	Військова техніка	Модернізація тепловізорів з фіксованим полем зору надаючи їм змінне поле зору
	Тепловізійні приціли для зброї	Підвищення ефективності застосування зброї в темну пору доби
	Фотореєстрація тепловізійних зображень	Можливість мати за допомогою однієї тепловізійної камери різні розміри тепловізійних зображень
	Тепловізійна відеозйомка	одного і того ж об'єкту з незмінної відстані до нього

Головною сферою застосування є військова техніка. У даному напрямку використання зум-афокальної насадки дає змогу спостерігати об'єкти з різним збільшенням при незмінному місці розташування спостерігача. Це дозволить використовувати лише один незмінний тепловізор, що зменшить витрати на військову техніку.

Визначимо перелік слабких, сильних та нейтральних техніко-економічних характеристик (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) та властивостей ідеї потенційного товару, що являється підґрунтям для формування його конкурентоспроможності. Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів наведено в таблиці 4.2

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких характеристик ідеї проекту

№ п/ п	Техніко- економічні характеристи ки ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторон а)	N (нейтр альна сторон а)	S (сильна сторон а)
		Мій проект	ULISSE RADICA L THERMA L	FLIR A310			
1.	Наявність зміни кутового збільшення системи без заміни об'єктиву	Присутня	Присутня	Присутн я			✓
2.	Використання в інфрачервоно му діапазоні	+	+	+		✓	
3.	Ціна насадки (\$)	500	700	900			✓

Продовження табл.4.2

4.	Розмір початкового капітало-вкладень (\$)	2000	5000	7000			✓
5.	Необхідність мати механізм переміщення компонентів оптики	+	+	+		✓	

Як видно з таблиці головними перевагами проекту для користувачів являються наявність зміни кутового збільшення системи без заміни об'єктиву, використання в інфрачервоному діапазоні, вартість пристрою і менші витрати на початкові витрати. У зв'язку з тим, що при розробці пристрою використовуються лінзові оптичні елементи, які повинні працювати в інфрачервоному діапазоні, та конструкція приладу вимагає складні механізми переміщень оптичних компонентів.

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В таблиці 4.3 проводиться аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ n/n	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Створення зум-	Розробка приладу на базі оптичних дзеркал	Існуюча технологія	Доступна технологія
2	афокальної насадки для об'єктиву тепловізора для	Розробка приладу на базі оптичних лінзових компонентів	Існуюча технологія	Доступна технологія
3	зміни його кутового збільшення	Розробка приладу на базі комбінації дзеркал і лінзових компонентів.	Існуюча технологія	Доступна технологія
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: «Розробка приладу на базі оптичних лінзових компонентів»				

З таблиці 4.3. обрано пункт 2 для реалізації ідеї проекту, тому що дана технологія дозволяє отримувати більш якісне зображення об'єкта, що спостерігається, через більші можливості до виправлення аберації системи та зменшення він'єтування пучків променів. До даної технології буде використовуватися параметричний синтез на базі теорії аберацій 3-го степеневого порядку з використанням програми Zemax. Дане поєднання технологій дасть змогу визначити та спробувати зменшити аберації системи на початковому етапі розробки приладу. Також дане поєднання технологій є доступним, що дає змогу провести глибокий аналіз.

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 4.4.).

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>№ п/ п</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	8
2	Загальний обсяг продаж, грн..	10000\$
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Висока конкуренція Час на отримання ліцензії
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відповідність міжнародним стандартам: ГОСТ Р53466-2009 ГОСТ Р8.619-2006
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30

На даний час на ринку спостерігається висока конкуренція між компаніями, що створюють пристрої для зміни кутового збільшення, що створює обмеження. У зв'язку з тим, що розроблюваний пристрій відноситься до воєнного обладнання й потребує отримання ліцензії збільшується час та витрати для виведення пристрою на ринок. Хоча коефіцієнт рентабельності не являється високим, але ринок являється перспективним так як потребує нових розробок та рішень.

Для отримання більш чіткої картини ситуації на ринку визначимо потенційні групи клієнтів (табл.4.5), їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи.

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Зміна кутового збільшення при використанні одного типу тепловізора	Військові	Надання переваги ергономіці та універсальності.	Низька ціна, Висока точність Зручність в експлуатації Невеликі габрити.
2	Реєстрація об'єктів з різним масштабом зображення при сталому місці спостереження	Військові та мисливці	Надається перевага ергономіці та універсальності.	Висока якість зображення Зручність в експлуатації Невеликі габарити.

У зв'язку з тим, що потреба використання тепловізора збільшуються у військовій галузі, постає проблема зміни їх оптичних характеристик, особливо зміни кутового збільшення. Військові бажають мати тепловізори з більшим діапазоном кутового збільшення так , як це полегшить їх роботу та дасть отримувати більш точний результат спостереження. Також це дасть змінити характеристики уже існуючого в них тепловізора за невисоку ціну. Також одним з факторів на рішення цільової аудиторії може впливати ергономічність, адже рухи військових не повинні бути скуті незручностями при використанні насадки.

Проведемо аналіз факторів ринкового середовища що сприяють ринковому впровадженню (табл. 4.6.) проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 4.7.),. Результати введемо до таблиці

Таблиця 4.6. Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Зріст використання тепловізорів у воєнній галузі	Збільшення використання тепловізорів та вимоги для спостереження об'єкту з усіх можливих сторін	Прискорення виробництва приладів, збільшення реклами
2	Вихід нових компонентів	Покращення характеристик компонентів, що використовуються у приладі	Використання більш сучасних компонентів.
3	Поява нових інвестиційних джерел	Поява нових інвестиційних джерел допоможе проводити дослідження для удосконалення пристрою, збільшення реклами	Проведення нових досліджень для майбутнього удосконалення пристрою Збільшення реклами
4	Зацікавленість держави	Отримання пільг для виплати податків	Розробка правильної маркетингової стратегії

Як видно з таблиці головними факторами для поліпшення становища даного сегменту ринку являється підвищення використання тепловізорів зі

змінним кутовим збільшенням, що збільшую потребу на ринку. Поява нових компонентів дозволить розвиватися й покращать характеристики пристрою, що призведе до збільшення зацікавленості клієнтів.

Таблиця 4.7. Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Зменшення використання тепловізорів у воєнній галузі	Зменшення виділених коштів на закупівлю тепловізорів	Можливе створення більш універсального приладу, а не вузько направлено
2	Ріст конкурентів	Ріст конкурентно-спроможних фірм	Покращення характеристик продуктів, випуск нових конкурентно-спроможних продуктів
3	Зміни компаній партнерів по поставці необхідних компонентів.	Поява ситуацій, що унеможлиблюють поставку тих чи інших компонентів.	Укладення договорів з різними постачальниками елементів
4	Інфляція	Зменшення купівельної спроможності населення.	Оптимізація використання доступних фінансових ресурсів
5	Поява приладів у конкурентів	Фірми-конкуренти можуть розробити аналогічні або наближені алгоритми для розрахунків	Патентування технології, Удосконалення технології.

Якщо підрахувати кількість факторів в таблиці 4.6 та 4.7, то негативних факторів більше, хоча в результаті того що даний сегмент ринку являється не насиченим це зменшує можливість негативного впливу. Одним з найбільш впливових й імовірних негативних факторів в нашій країні являється зниження виділених державних коштів на військову галузь, що призведе до зниження закупівлі нових обладнань. Одним з рішень даної проблеми можна вважати зміну конструкторського рішення, при якому даний пристрій буде використовуватися з іншими приладами в іншій галузі.

Надалі проведемо аналіз пропозиції (табл. 4.8.), де визначимо загальні риси конкуренції на ринку.

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Тип конкуренції Олігополія	На ринку існує не багато фірм які випускають продукцію даного типу, оскільки ринок є специфічним.	Потрібно працювати над репутацією компанії, забезпечуючи високу якість приладу.
2. За рівнем конкурентної боротьби Національний	Замовниками таких товарів є фірми з різних куточків світу. Доставка товару не відіграє велику роль в цьому сегменті	Потрібно як можна більше розширювати горизонти співпраці
3. За галузевою ознакою внутрішньогалузева	Основною галуззю є військова галузь, а саме військова техніка	Розширювати можливості використання приладів

Продовження таблиці 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-родова	Спостерігається конкуренція між тепловізорами та тепловізорами з панкратичними об'єктивами	Підвищення якості та зменшення похибки пристрою.
6. За інтенсивністю - марочна	Велику роль відіграє репутація компанії, що виготовляє пристрій	Збільшення кількості реклами.

Оскільки ринок є специфічним й ненасиченим, на сьогоднішній час на ринку існує лише дві фірми які випускають продукцію даного типу, але існують товари замітники, які змінюють кутове збільшення визначеному значенню і дають гіршу якість зображення об'єкту. Головною характеристикою, що може впливати на ринок являються постачальники компонентів так, як ціна на оптичні компоненти дуже висока.

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за моделлю п'яти сил М. Портера (табл. 4.9.)

Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

<i>Складові аналізу</i>	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
	<i>Навести перелік прямих конкурентів</i>	<i>Визначити бар'єри входження в ринок</i>	<i>Визначити фактори сили постачальників</i>	<i>Визначити фактори сили споживачів</i>	<i>Фактори загроз з боку замінників</i>
Висновки: ринок не є насиченим, але конкуренція висока, оскільки компанії які являються конкурентами мають високу репутацію. Завадою являється необхідний високий рівень капіталовкладень	FLIR Systems, Videotec	Висока репутація конкурентних фірм Необхідний розмір капіталовкладень Необхідний час на отримання ліцензії	Зазвичай постачальники диктують умови співпраці	Споживачі можуть бути чутливі до зміни ціни, проводять контроль якості	Використання звичайних тепловізорів з різним збільшенням. Приклади компаній: Pulsar, Helion, Axion, Accolade

Головними бар'єрами для входження на ринок являється висока конкуренція. Хоча ринок і не є насиченим, військові бажають співпрацювати з

перевіреними компаніями, що мають уже відомі для них «результати». В таких компаній техніка має схожі ергономічні властивості, що дозволяє військовому швидко адаптуватися до нових технологічних рішень. Ще однією завадою є необхідність у високому початковому капіталовкладенні. Рішенням даної проблеми може стати пошук інвесторів.

На основі аналізу конкуренції, проведеного наведеного в табл. 4.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту, що наведені в табл. 4.2, вимог споживачів до товару (табл. 4.5.) та факторів маркетингового середовища (табл. 4.6, 4.7) визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлено в табл. 4.10.

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
1	Рівень якості товару та його стабільність	Використання насадки для звичайного тепловізора, зміна його кутового збільшення
2	Цінова політика	Ціна на прилади буде відносно нижча за прилади конкурентних підприємств
3	Модульність	Принцип модульності, що дозволить введення системи в інші пристрої (приціли рушниць, фотокамери та відеокмери)
4	Ергономічність	Зручність у використанні
5	Механізм переміщень	Зручний механізм переміщень компонентів дає змогу змінювати або залишити стале значення збільшення тепловізора

Продовження табл.4.10

6	Готова методика виготовлення	При готовій методиці виготовлення зменшується час очікування для покупця
7	Обслуговування	Споживачам не потребуються консультації як в технічних так і в експлуатаційних питаннях
8	Репутація	У зв'язку зі специфічністю даного сегменту ринку даний фактор є важливим для остаточного рішення клієнта

Для підвищення «довіри» до товару необхідно впершу чергу приділити увагу таким факторам конкурентоспроможності як рівень якості товару та стабільність, що забезпечує точність проведення аналізу, обслуговування, що забезпечить технічну підтримку приладу, приділяти увагу до зручності і легкості застосування.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 4.11).

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «OPTICALAF2009»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з FLIR Systems, Videotec						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Стабільність (точність)	20						✓	
2	Обслуговування	19							✓
4	Цінова політика	17					✓		
5	Механізм переміщень	17					✓		

Продовження табл.4.11

8	Репутація	16				✓			
6	Ергономічність	12					✓		
7	Готова методика виготовлення	10		✓					
3	Модульність	10	✓						

Як видно з таблиці 4.11 в розробці пристрою надано перевагу таким факторам як точність що являються головними фактором для позитивного рішення клієнта та обслуговування, що забезпечить технічну підтримку пристрою. Слабкими сторонами пристрою являється модульність, що унеможливило введення пристрою як допоміжного вузла в уже існуючі пристрої спостереження, та репутація, як нової фірми в даному сегменті ринку.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities), що наведено в таблиці 4.12. на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 4.11).

Таблиця 4.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
– Стабільність (точність)	– Готова методика виготовлення
– Обслуговування	– Модульність
– Цінова політика	– Репутація
– Механізм переміщень	
– Ергономічність	

Продовження табл. 4.12

<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Зріст використання тепловізорів у військовій галузі – Вихід нових компонентів – Поява нових інвестиційних джерел – Зацікавленість держави 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Зменшення використання тепловізорів у військовій галузі – Ріст конкурентів – Зміни компаній партнерів по поставці необхідних компонентів. – Інфляція – Поява приладів у конкурентів
---	---

Необхідно передбачати появу несприятливих умов, таких як поява нових пристроїв у конкурентів та мінливість ринку для можливості швидкої реакції та зменшення наслідків. При цьому потрібно покращувати репутацію, за рахунок реклами та удосконалення з використанням нових технологій у пристрої.

На основі SWOT-аналізу розробимо альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.13).

Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Створити перші прототипи у вигляді експериментальних зразків	Отримання ресурсів буде швидким за рахунок швидкої доставки вже готової продукції	1-2 тижні
2	Заміна існуючих компонентів компонентами з кращими характеристиками	Використання оптичних компонентів інфрачервоної області вимагає виготовлення з особливого матеріалу та з особливим покриттям. У випадку зміни ситуації на ринку, можна завжди у якості альтернативи використати готові оптичні компоненти інфрачервоного діапазону.	1 місяць

Найкращою альтернативою буде використання другого пункту. Хоча створення перших прототипів у вигляді експериментальних зразків має менші строки реалізації, але дана ринкова поведінка не зможе забезпечити достатньої якості та ергономічності, що буде заважати користувачам при роботі з даним пристроєм.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розробка ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл.4.14) .

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ п/п</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1	Науковий	Висока	Середній	Інтенсивна	Висока складність
2	Військова галузь	Висока	Високий	Інтенсивна	Висока складність
3	Мисливство	Висока	Низький	Не інтенсивна	Низька складність
<i>Висновок: обрано цільові групи: військові</i>					

Головними споживачами даної продукції являються військові, що потребуються нових технологій для визначення та реєстрації об'єкту, що спостерігається, особливо в нічний час. Це забезпечує активність даної групи, а як результат і можливість швидкого входження у сегмент. Що до наукового сегменту проявляє активність для реєстрації тепловізійних зображень для наукового дослідження. Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (табл. 4.15.).

Таблиця 4.15 Визначення базової стратегії розвитку

<i>№ n/n</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспромож ні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>
1	Заміна компонентів з кращими характеристиками	Швидке налаштування виробництва під мінливий ринок. Висока якість обслуговування	Підвищення точності за рахунок збільшення діапазону зміни кутового збільшення. Обслуговування. Можливість включення даного пристрою до існуючих, що спростить використання.	Стратегія диференціації

У результаті того, що запропонований продукт являється специфічним, в першу чергу він базується на потребах військових. Останнім групам клієнтів будуть запропоновані можливі часткові модифікації. Диференціація продукту буде полягати у високій точності, що буде забезпечуватися новим математичним алгоритмом, та обслуговування, що буде забезпечувати технічну підтримку пристрою.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ n/n</i>	<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки</i>
1	Першопрохідцями являються FLIRSystems, Videotec, які використовую вбудований трансфокатор	Забирати існуючих клієнтів у фірм конкурентів	Так, планується закупляти схожі оптичні компоненти що і у фірми конкурента.	Заняття конкурентної ніші

У зв'язку з тим, що розмір ринкового сегменту являється не великим, при цьому являється досить прибутковим, стратегією конкурентної поведінки обрано «заняття конкурентної ніші». Цьому сприяє високий поріг для входження в даний сегмент ринку, що забезпечує захищеність від появи великої кількості конкурентів. Основною стратегією при цьому компанії повинно буде обрати турботу та завоювання прихильності споживача. Це можна зробити за рахунок підвищення точності пристрою та високої технічної якості обслуговування.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробимо стратегію позиціонування (табл. 4.17).

Таблиця 4.17 - Визначення стратегії позиціонування

<i>№ п/ п</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспромож ні позиції власного стартап-проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1	Якість	Стратегія диференціа ції	Швидкість, точність, стабільність	Точність, швидкість,
2	Обслуговув ання	Стратегія диференціа ції	Легко в використанні та обслуговувати, швидкий ремонт,	Легкість, простота
3	Ціна	Стратегія диференціа ції	Доступна цінова політика, Висока якість.	Гнучкість, доступність, якість

Як видно з таблиці 4.17 для задоволення потреб даної товарно-цінової аудиторії необхідно щоб товар мав такі властивості як якість, обслуговування та ціна. Ці всі елементи можна забезпечити високою точністю, швидкістю та стабільністю роботи пристрою у поєднанні з легким обслуговування та можливим швидким ремонтом. Для формування правильної і точного представлення споживачів про проект, щоб в майбутньому клієнти не плутали товар з іншими видами продукції, сформовано ринкові позиції, комплекс асоціацій таких як «точність й швидкість», «легкість й простота».

4.5Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач табл. 4.18.

Таблиця 4.18 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	Якість	Високі характеристики стабільності системи Простота в використанні	Можливість підвищити якості та точності приладу за рахунок урахування всіх параметрів та факторів використання та характеристик приладу.
2	Швидкість	Швидкість роботи приладу	Зміна кутового збільшення за рахунок механічних переміщень, дає змогу швидко налаштувати об'єкти тепловізора на потрібне значення збільшення

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару є важливим етапом в розробленні стартап-проекту для задоволення потреб і забезпечують очікувані вигоди як для споживачів, так і для товаровиробників. Тому вигідними сторонами товару обрано високі характеристики стабільності, точності та швидкості, що надає перевагу даному пристрою у порівнянні з конкурентами.

Розробимо трирівневу маркетингову модель товару (табл. 4.19).

Таблиця 4.19 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Прилад використовується для зміни кутового збільшення тепловізорів нічний час. Дана концепція дасть змогу спостерігати об'єкт з різних ракурсів при сталому місці

	розташування спостерігача.
--	----------------------------

Продовження табл.4.19

II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики				
	1. Діапазон кутового збільшення , 2ω	6.9°÷62.4°	Нм	Тх	
	2. Кількість оптичних компонентів, шт.	4	Нм	Тх	
	3. Коефіцієнт він'єтування пучків,k	1	Нм	Тл	
	4. Розмір конструкції насадки	100 мм	М	Тх	
	5. Діапазон інфрачервоного випромінювання , мкм	3÷14	Нм	Тл	
	Відповідність до ГОСТ Р 53466-2009, ГОСТ Р8.619-2006				
	Пластиковий чемодан				
	Марка: «OPTICAL, AF2019»				
III. Товар із підкріпленням	До продажу навчання				
	Після продажу технічне обслуговування, інформаційна підтримка				
Потенційний товар буде захищено від копіювання за рахунок логотипу, введення комерційної таємниці на розрахунки та конструкцію модуля, патент.					

Для спрощення задачі первинного орієнтування і представлення проекту в цілому було розроблено трирівневу маркетингову модель товару, що відображають складові задуму розробки та реальні характеристики. Чітко поставлена задача у досягненні високої швидкості та точності для можливості вирізнення запропонованого товару від товарів аналогів.

Наступним кроком визначимо цінові межі (табл. 4.20).

Таблиця 4.20 - Визначення меж встановлення ціни

<i>№ n/n</i>	<i>Рівень цін на товари- замінники (дол.)</i>	<i>Рівень цін на товари- аналоги (дол.)</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів (дол.)</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар (дол.)</i>
1	300	700-900	2000	450-550

Як видно з таблиці 4.20 передбачувана вартість пристрою «OPTICALAF2009» являється нижчою, ніж ціна на сучасні аналоги, що дозволить збільшити кількість клієнтів. Нижній рівень відповідає ціні товарів замінників, які дають змогу змінити кутове збільшення об'єктиву тепловізора лише на одне конкретне значення. Проте в даний час військові відмовляються від таких насадок так, як вона забезпечує тільки одне стає значення кутового збільшення та дає не дуже якісне зображення об'єкту, що спостерігається.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 4.21).

Таблиця 4.21 Формування системи збуту

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Попереднє замовлення з підписанням контракту	доставка в строки, контроль за уникненням пошкоджень	Прямий	Прямий

Для забезпечення ефективної реалізації стартап-проекту оптимальною системою збуту обрано прямий, без залучення посередників між виробником та

споживачем. Для економії коштів попереднє замовлення буде проводитися за допомогою електронного сайту. Виробник буде забезпечувати контроль за доставкою в строки та без пошкоджень.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів

Таблиця 4.22 Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
1.	Клієнтам потрапляє інформація про аналоги через інтернет	Інтернет, фахові видання, соц. мережі	Інтернет- маркетинг, реклама у соц. мережах	Інформування потенційних клієнтів про компанію, про її діяльність, про характеристики продукції через інтернет, виставки.	Насадка OPTICAL AF2009 дасть змогу точно та швидко змінити характеристики вашого тепловізора, без великих затрат.

У зв'язку з тим, що більшість потенційних клієнтів користуються інтернет ресурсами для пошуку необхідної інформації, тому основна маркетингова комунікація буде через інтернет. Створення інтернет сторінки з

відео візуалізацією та вказаними повними характеристиками пристрою та консультативний центр дозволить клієнтам отримати більше додаткової інформацію.

Висновок до розділу

Зважаючи на отримані результати в процесі розробки стартап-проекту можна сказати, що у зв'язку з тим, що збільшилось використання тепловізорів у війсьній галузі, виникла потреба в забезпеченні військових новими технологіями для визначення та реєстрації об'єкту, що спостерігається, особливо в нічний час. Ринок подібних засобів такого типу є специфічним й ненасиченим, оскільки на сьогоднішній час існує лише дві фірми (між якими спостерігається висока конкуренція) які випускають продукцію даного типу: FLIR Systems, Videotec.

В ході проведення аналізу стартап-проекту були визначені ключові переваги концепції приладу в порівнянні з приладами конкурентів, що являється важливим етапом для задоволення потреб і забезпечує очікувані вигоди як для споживачів, так і для товаровиробників. Вигідними сторонами товару обрано високу якість та швидкість. Але потреба у високому початковому капіталі для створення першого прототипу пристрою та необхідність отримання ліцензії, яка збільшує час виведення пристрою на ринок, являються обмеженнями для швидкої реалізації проекту. Одним з найбільш впливових й імовірних негативних факторів в нашій країні являється зниження виділених державних коштів на військову галузь, що призведе до зниження закупівлі нових обладнань. Одним з рішень даної проблеми можна вважати зміну конструкторського рішення, при якому даний пристрій буде використовуватися з іншими приладами в іншій галузі.

У зв'язку з тим, що більшість потенційних клієнтів користуються інтернет ресурсами для пошуку необхідної інформації, тому основна маркетингова комунікація буде через інтернет. Створення інтернет сторінки з відео візуалізацією та вказаними повними характеристиками пристрою та консультативний центр дозволить клієнтам отримати більше додаткової

інформацію. Для забезпечення ефективної реалізації стартап-проекту оптимальною системою збуту обрано прямий підхід – без залучення посередників між виробником та споживачем.

З огляду на проведений аналіз негативних та позитивних факторів, що можуть вплинути на створення зум-афокальної насадки для тепловізора, даний стартап- проект являється перспективним для розвитку і є затребуваним в даному сегменті ринку.

ВИСНОВОК

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача, що сформульована в завданні і спрямована на створення оптичної системи зум-афокальної лінзової насадки до об'єктиву тепловізора шляхом синтезу лінзової телескопічної системи галілеєвського типу, яка дозволяє надати стаціонарному штатному об'єктиву тепловізора функцій трансфокатора із плавною зміною кута поля зору в діапазоні $5.7^{\circ} \div 17^{\circ}$ з трикратною зміною масштабу зображення на екрані монітора.

При вирішенні вказаної задачі отримано наступні результати:

1. Зроблено огляд та порівняльний аналіз існуючих телескопічних систем, які використовуються в трансфокаторах, показано, що відомі системи не можуть повністю задовольнити вимогам технічного завдання на проектування афокальної оптичної системи насадки через характерне для них велике він'єтування нахилених до оптичної осі пучків променів, яке обумовлено обов'язковим розміщенням апертурної діафрагми за межами афокальної системи.

2. Розроблено методику габаритного розрахунку трилінзової та чотирьохлінзової зум-афокальної системи галілеєвського типу у тонких компонентах з урахуванням габаритних обмежень, заданого діапазону зміни кутового збільшення та допустимого він'єтування на краю поля зору

3. На основі теорії аберації 3-го степеневого порядку і теорії основних параметрів проф. Слюсарєва Г.Г. зроблено параметричний абераційний синтез чотирьохкомпонентної лінзової зум-афокальної системи та зроблено параметричну оптимізацію цієї системи з метою корекції сферичної аберації, коми та хроматизму положення. Результатом є досягнення того рівня якості зображення в площині багатоеlementного фотоприймача заданого тепловізора, яке узгоджено з геометричними параметрами фоточутливих елементів його фотоприймача. Визначено конфігурацію щілин в механізмі переміщень лінзових компонентів, які забезпечують збереження телескопічності в межах заданої зміни кутового збільшення.

4. Отримані результати і матеріали роботи мають універсальний характер і можуть використовуватись при аналогічній модернізації інших моделей тепловізорів.

5. Розроблено стартап проект з метою комерціалізації результатів розробки зум-афокальної насадки до тепловізорів.

6. Подальші вдосконалення методики проектування зум-афокальних оптичних систем потрібно спрямовувати на розширення функціональних можливостей цих систем із одночасним забезпеченням високих вимог до якості зображень у заданих діапазонах зміни кутового збільшення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Афокальная оптическая система [Электронный ресурс]: – Режим доступа: https://traditio.wiki/Афокальная_оптическая_система.
2. Теория оптических систем / [Б.Н.Бегунов, Н.П.Заказнов, В.И. Кузичев и др.] . – М.: Машиностроение.–1981.–432 с.
3. Пат.2006050 Российская федерация, МПК G02В 15/12. Афокальная широкоугольная насадка/ Савоскин В. И., Березенцева Г. Г.; заявители и патентообладатели Савоскин В. И., Березенцева Г. Г. - №5056913/10, заявл. 28.07.1998; опубл. 15.01.2000., Бюл №8.
4. Пат.2003144 Российская федерация, МПК G02В 15/12. Широугольные афокальные насадки / Савоскин В. И., Березенцева Г. Г., БЕРЕЗЕНЦЕВА Л. Г.; заявители и патентообладатели Савоскин В. И., Березенцева Г. Г., БЕРЕЗЕНЦЕВА Л. Г. - №5020469/12, заявл. 15.11.2000; опубл. 03.01.2002. Бюл №10.
5. Пат.2060521 Российская федерация, МПК G02В 15/12. Афокальная насадка/ Савоскин В. И., Березенцева Г. Г., БЕРЕЗЕНЦЕВА Л. Г.; заявители и патентообладатели Савоскин В. И., Березенцева Г. Г., БЕРЕЗЕНЦЕВА Л. Г. - № 99 99037536, заявл. 20.05.1999; опубл. 22.07.2001. Бюл №9.
6. Пат.2077145 Российская федерация, МПК G02В 15/12. Афокальная насадка/ Савоскин В. И., Воронов Р.В.; заявители и патентообладатели Савоскин В. И., Воронов Р.В. - № 2775207/12, заявл. 17.01.2000; опубл. 27.11.2003. Бюл №12.
7. Allen Mann, Infrared Optics and Zoom Lenses// SPIE Publications–2009– P. 164.
8. Горячева В.А. Обзор панкратических объективов для телевизионных систем // Известия ТулГУ. Технические науки - 2017- № 9 ч.2 - С.202-210.
9. Пат.2359294 Российская федерация, МПК G02В 15/16. ИНФРАКРАСНЫЙ ОБЪЕКТИВ С ПЛАВНО ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ/ Иванов В. П., Козлов С.Д., Морозов

А.Е., Нигматуллина Н. Г.; патентообладатели Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно-производственное объединение "Государственный институт прикладной оптики" (ФГУП "НПО "ГИПО") - № 2007135969/28, заявл. 27.09.2007; опубл 20.06.2009. Бюл№17.

10. ArturHoegeleAfocal Zoom Lenses and their Applications [Электронный ресурс].–Режим
доступу:<https://www.researchgate.net/publication/258720089>
11. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов / В.Н. Чуриловский.- М.:Машиностроение ,1966.-564 с.
12. УльяноваЕ. О. Оптическая система с двумя полями зрения для тепловизионных приборов на основе матричных фотоприемных устройств // Прикл. физика. -2012.-№ 3. -С. 91-94.
13. Mau-Shiun ,Yeh Shin-Gwo, Shiue Mao-Hong Lu First-order analysis of a three-lens afocal zoom system// Opt. Eng. -1997.-№4.-P.1249–1258 .
14. David G. Norrie ,Refractingafocal systems in thermal imagers//OPTICAL ENGINEERING .-1986.-№2 .
15. JinkaiZhang,XiaoboChen, JuntongXi, ZhuoqiWu,Paraxialanalysisofdoublesidedtelecentriczoomlenseswiththreecomponents// AppliedOptics.-2014. -№ 22.-С. 4957-4967.
16. Поспехов В. Г., Ровенская Т. С., Крюков А. В. Исследования в области расчета панкратического объектива постоянной длины для цифровой фотокамеры //Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. - 2010. - № 4. - С. 27-38.
17. Нгуен Ван Луен. Автоматизация проектирования панкратической телескопической системы//Оптический журнал. -2013 Т.80-№12.-С. 22-25.
18. Antonin Miks ,Jiri Novak,Paraxial analysis of four-component zoom lens with fixed distance between focal points//Applied Optics -2012 .-№ 2.1 - P.5231-5235.

19. Пахомов И. И., Пискунов Д. Е., Хорохоров А. М., Ширанков А. Ф. Автоматизированный габаритный расчет вариообъективов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". -2010. -№3. -С. 26-41.
20. Олейник С. В., Хацевич Т. Н. Способ построения оптической системы с дискретным изменением фокусного расстояния // Изв. вузов. Приборостроение.-2009. Т. 52.- № 6. -С. 58-62.
21. Чиж І.Г., Лісняк І.Г. Трикомпонентні лінзові зум-афокальні системи трансфокаторів // Наукові вісті КПІ, №3, 2019, С.73-79.